

# Entwicklung, Aufbau und Test eines neuen Kryostatmoduls für den S-DALINAC

Vom Fachbereich Physik  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades  
eines Doktors der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)

genehmigte

**D i s s e r t a t i o n**

angefertigt von

Dipl.-Phys. Thorsten Kürzeder  
aus Heidelberg

Darmstadt 2013

D 17

Referent: Professor em. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. A. Richter

Korreferent: Professor Dr.-Ing. T. Weiland

Tag der Einreichung: 15. Oktober 2012

Tag der Prüfung: 26. November 2012

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-33533

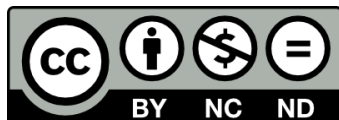
URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3353>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung - Keine kommerzielle Nutzung - Keine Bearbeitung 2.0 Deutschland

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/>



# Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden sowohl ein neues Beschleuniger-Kryostatmodul für den supraleitenden Injektor des S-DALINAC als auch drei supraleitende Kavitäten entworfen und hergestellt. Diese Maßnahmen hatten die Erhöhung der maximalen Strahlenergie hinter dem Injektorbeschleuniger von 10 MeV auf 14 MeV bei Strahlströmen von bis zu 250  $\mu\text{A}$  statt bisher 60  $\mu\text{A}$  zum Ziel.

Diese Intensitätserhöhung machte dabei auch eine Erhöhung der eingekoppelten Hochfrequenzleistung von 500 W auf 2 kW erforderlich. Dafür wurden neue Hochfrequenzeinkoppler am Institut für Theorie elektromagnetischer Felder an der Technischen Universität Darmstadt entworfen. Um diese verwenden zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neues Kryostatmodul entwickelt, bei dem eine WR-284 Rechteckhohlleiterverbindung durch alle Druck- und Temperaturstufen verläuft. Die neue Konstruktion ist an die der Standardkryostate des S-DALINAC angelehnt, um bei gleichen Dimensionen und Anschlüssen für Strahl- und Isoliervakuum, sowie den notwendigen Verbindungen für Helium und Stickstoff, das bisherige Injektormodul ersetzen zu können. Für die WR-284 Hohlleiterdurchführung wurde der Turmbereich völlig neu gestaltet, so dass ausreichend Platz für eine saubere Montage unter Reinraumbedingungen zur Verfügung steht. Die eigens für dieses Projekt angefertigten Hohlleiterbälge zeigen hierbei hervorragende HF-Eigenschaften und stellen die notwendige Flexibilität der Transferleitung sicher. Ebenso wurde ein Blendenelement entwickelt, um als Alternative zu einem kalten Fenster bei einer Zwischentemperatur die Verluste durch Wärmestrahlung innerhalb der Hohlleiter zu minimieren. Alle Hohlleiterelemente wurden im Rahmen dieser Arbeit auf Ultrahochvakuumtauglichkeit getestet und hochfrequenztechnisch vermessen.

Im Zuge der Herstellung des Kryostatmoduls wurde der Heliumtank mit einer neuen, signifikant verbesserten, magnetischen Abschirmung ausgestattet. Abschließende Messungen ergaben für das äußere Magnetfeld im Bereich der supraleitenden Kavitäten im Heliumtank einen Durchschnittswert von 4  $\mu\text{T}$ . Hiermit ist es am S-DALINAC erstmals möglich, bei Präparation der Beschleunigungsstrukturen unter saubersten Bedingungen, eine unbelastete Güte  $Q_0$  von  $3 \cdot 10^9$  zu erreichen.

Um den gesteigerten Anforderungen an das neue Beschleunigermodul gerecht zu werden, wurden ebenfalls drei neue 20-zellige Beschleunigungsstrukturen (Kavitäten) hergestellt. Ihre Fertigung erfolgte nicht mehr aus Einzelzellen, sondern dem neuesten Stand der Technik entsprechend aus Hanteln, was eine optimale Präparation der 20-zelligen Kavitäten ermöglichte. Die zur Produktion erforderlichen Simulationen und Messungen wurden ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt, so dass am Ende der Fertigung alle drei Beschleunigungsstrukturen erfolgreich bei der korrekten Länge auf der richtigen Frequenz feldglatt eingestellt waren.

Für die vorliegende Arbeit wurde das Kryostatmodul mit einer Kavität bestückt und testweise außerhalb des Beschleunigers abgekühlt. Die Tests bei 2 K und 4 K ergaben eine gute Funktionalität in Hinblick auf die Dichtigkeit der verschiedenen Druckbereiche und auch die thermischen Verluste in den Heliumtank lagen mit 5–6 W im Rahmen der Anforderungen. Zuletzt konnte die externe Güte  $Q_{ex}$  der neuen Hochfrequenzeinkoppler zu  $6.25 \cdot 10^6$  bestimmt und damit der im Entwurf angestrebte Wert von  $Q_{ex} = 5 \cdot 10^6$  nahezu exakt bestätigt werden.

Nach den erfolgreich durchgeführten Tests steht das neue Modul nunmehr zum Einsatz am Injektor des S–DALINAC bereit. Mit zwei der drei neuen Beschleunigungsstrukturen kann es vollständig bestückt das bisherige Modul ersetzen, so dass dieses dann als Ersatzmodul für den Hauptbeschleuniger bereit gehalten werden kann. Hierdurch wird es in Zukunft möglich sein, Wartungsarbeiten erheblich zu verkürzen.

# Abstract

Within the work presented here, a new cryostat-module for the superconducting injector accelerator of the S-DALINAC as well as three superconducting cavities have been designed and built. The aim of these efforts was an increase in energy behind the injector from 10 MeV to 14 MeV and in beam current from 60  $\mu\text{A}$  to 250  $\mu\text{A}$ .

Such an upgrade in intensity required an increase of the input radio-frequency (RF) power from 500 W to 2 kW. For this purpose new RF power couplers had been designed at the Institut für Theorie elektromagnetischer Felder at the Technische Universität Darmstadt. In order to enable the use of these couplers a new cryostat-module with a WR-284 rectangular waveguide transition line through all pressure and temperature stages was developed within the work presented here. The new construction was designed following that of the standard cryostats of the S-DALINAC. Because the dimensions and adapters for the beam and insulating vacuum as well as the connections needed for helium and nitrogen supply of both cryostats agree, the present module can be simply replaced by the new one. For the WR-284 waveguide feed-through the tower section was redesigned to provide enough space for an assembly under clean-room conditions. The waveguide bellows, specially built for this project, show excellent RF properties and provide the flexibility needed for the transfer line. As an alternative to a cold vacuum window a special waveguide with diaphragms at an intermediate temperature has been developed in order to minimize losses due to heat radiation inside the waveguide. All waveguide components were tested for ultra-high-vacuum capability and their RF properties have been determined within this work.

Within the process of the fabrication of the cryostat module the helium vessel was equipped with a significantly improved magnetic shielding. Final measurements inside the helium vessel showed an average value of 4  $\mu\text{T}$  for the magnetic field at the positions of the superconducting cavities. For the first time, this will allow the achievement of an intrinsic quality factor  $Q_0$  of  $3 \cdot 10^9$  for the superconducting cavities at the S-DALINAC, if state-of-the-art preparation techniques are used.

Three new 20-cell cavities were built to meet the increased requirements for the new accelerator module. Instead of fabricating these structures from single cells,

state-of-the-art techniques using dumbbells were applied in order to provide an optimal treatment of the 20-cell cavities. Prior to the production, simulations and measurements were carried out during the course of the present work, such that all three cavities were successfully tuned to the right frequency and field flatness at the correct length.

For an offline test the cryostat module was equipped with one cavity and cooled down. Tests at 2 K and 4 K demonstrated leak tightness of the various pressure stages and the thermal losses of 5-6 W to the helium vessel were also within requirements. Finally, the external quality factor  $Q_{ex}$  of the new RF input coupler was measured to be  $6.25 \cdot 10^6$ , thus almost matching the desired design value of  $5 \cdot 10^6$ .

After these successful tests the new module is ready to be installed at the injector of the S-DALINAC. Equipped with two of the three new cavities it will replace the current module, which, in turn, will serve as a spare for the main accelerator of the S-DALINAC, thus reducing maintenance periods in future.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Anforderungen an den neuen Injektor des S-DALINAC</b>	<b>3</b>
2.1	S-DALINAC . . . . .	3
2.2	Beschleunigungsstrukturen . . . . .	5
2.3	Kryostatmodule . . . . .	8
2.4	Neue Einkoppler . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Konzeption des neuen Beschleunigerkryostaten</b>	<b>14</b>
3.1	Vorbemerkungen . . . . .	14
3.2	Mechanische Stabilität der Druckbehälter . . . . .	16
3.3	Hohlleiterdurchführung . . . . .	18
3.4	Transferleitung für Motorwelle und Elektrik . . . . .	20
3.5	Abschätzung des Wärmeeintrags . . . . .	21
3.6	Herstellung des Moduls . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Herstellung und Test verschiedener Komponenten</b>	<b>26</b>
4.1	Test des Stickstoffschilds . . . . .	26
4.2	Magnetische Abschirmung . . . . .	29
4.2.1	Einfluss von Magnetfeldern auf die Resonatorgüte . . . . .	29
4.2.2	Messung des Magnetfelds im neuen Heliumtank . . . . .	30
4.3	Hohlleiterkomponenten . . . . .	33
4.3.1	Flexible Elemente . . . . .	33
4.3.2	Vakuumfenster . . . . .	34
4.3.3	Blendenelement . . . . .	35

<b>5</b>	<b>Herstellung neuer Beschleunigungsstrukturen</b>	<b>39</b>
5.1	Möglichkeiten zur Frequenzabstimmung . . . . .	41
5.1.1	Physikalisches Prinzip . . . . .	41
5.1.2	Anwendung auf Beschleunigungsstrukturen . . . . .	42
5.2	Halbzellengeometrie und Zielfrequenzen . . . . .	43
5.3	Planung der Produktion . . . . .	44
5.4	Frequenzmessungen an Hanteln . . . . .	45
5.4.1	Messstand . . . . .	45
5.4.2	Testhanteln . . . . .	47
5.4.3	Hanteln und Endgruppen für die Produktion . . . . .	49
5.5	Herstellung der ersten Kavität . . . . .	52
5.5.1	Berechnung der Abdrehmaße . . . . .	52
5.5.2	Fertigstellung der ersten Kavität . . . . .	54
5.6	Herstellung der Kavitäten Nr. 2 und 3 . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Montage und erstes Abkühlen</b>	<b>58</b>
6.1	Montage des Kryostatmoduls für den Testlauf . . . . .	58
6.2	Aufbau des Kryostatmoduls im Pumpstandsraum des S-DALINAC	60
6.3	Abkühlen des Moduls . . . . .	63
6.3.1	Kopplergüten bei 4 K . . . . .	66
6.3.2	Verlustleistung im Heliumtank . . . . .	68
<b>7</b>	<b>Schlussbemerkung und Ausblick</b>	<b>70</b>
<b>A</b>	<b>Montage</b>	<b>72</b>
<b>B</b>	<b>Zeichnungen der Halbzellen</b>	<b>74</b>
<b>C</b>	<b>Daten aus der Hantelproduktion</b>	<b>76</b>

# 1 Einleitung

Seit 1991 wird am Institut für Kernphysik der TU Darmstadt der supraleitende Elektronenlinearbeschleuniger S-DALINAC (Superconducting Darmstadt Electron Linear Accelerator) betrieben [1, 2]. Er verfügt über zwei Beschleunigungsstrecken, den Injektor und den Hauptbeschleuniger, wobei letzterer mit Hilfe von zwei Rezirkulationen bis zu dreimal genutzt werden kann. Die Beschleunigung der Elektronen erfolgt durch Hochfrequenzfelder mit einer Frequenz von 2.997 GHz in Niobresonatoren, die innerhalb von Kryostaten in einem Bad aus suprafluidem Helium bei einer Temperatur von 2 K betrieben werden. Durch die extrem geringen Hochfrequenzverluste der supraleitenden Resonatoren ermöglichte der S-DALINAC zahlreiche kernphysikalische Experimente im Dauerstrichbetrieb. Parallel zum Experimentierbetrieb wurde der Beschleuniger im Rahmen von Diplom- und Doktorarbeiten stetig verbessert, sowie an neue experimentelle Aufgaben angepasst. So wurde am Institut für Kernphysik zum ersten Mal in Deutschland ein Freie-Elektronen-Laser entwickelt und betrieben [3, 4]. Seit 2003 ist der S-DALINAC zentrales Forschungsgrößgerät des Sonderforschungsbereichs 634 „Kernstruktur, nukleare Astrophysik und fundamentale Experimente bei kleinen Impulsüberträgen am supraleitenden Darmstädter Elektronenbeschleuniger S-DALINAC“, in dessen Rahmen weitere Verbesserungen der Intensität und Stabilität des Elektronenstrahls des S-DALINAC sowie Erweiterungen des Experimentierprogramms vorgenommen werden. So wurde beispielsweise 2010 eine neue, digitale Hochfrequenzregelung für die supraleitenden und normalleitenden Kavitäten in Betrieb genommen [5, 6], sowie eine neue Quelle für spinpolarisierte Elektronen in den Beschleuniger integriert [7]. Eine weitere Neuerung ist die Verbesserung der Energieschärfe des Elektronenstrahls durch nicht-isochrones Rezirkulieren, das im Sommer 2012 erfolgreich für Experimente benutzt wurde [8]. In naher Zukunft sollen weitere Projekte umgesetzt werden. So ist geplant die Endenergie des Beschleunigers durch den Einbau einer dritten Rezirkulation [9] weiter zu erhöhen und die Energieschärfe des Elektronenstrahl durch zwei Scraper-Systeme [10] weiter zu verbessern.

Neben den Experimenten, die auf die hohen Strahlenergien durch Betrieb mit rezirkuliertem Elektronenstrahl angewiesen sind [11–18], können am S-DALINAC derzeit auch Experimente mit niedrigen Energien zwischen 2.5 MeV und 10 MeV

durchgeführt werden. Zu diesem Zweck befindet sich hinter dem Injektor ein Messplatz für Experimente mit niederenergetischen Photonen (Darmstadt High-Intensity Photon Setup DHIPS) [19–21]. In Zukunft soll es möglich sein, Elektronenstrahlen mit bis zu 14 MeV und 150–250  $\mu\text{A}$  anstelle des bisherigen Maximums von 10 MeV und 60  $\mu\text{A}$  für diesen Experimentierplatz zu nutzen. Um diese Anforderungen zu erfüllen muss allerdings unter anderem die für den Strahl verfügbare Hochfrequenzleistung deutlich erhöht werden.

Diese Arbeit befasst sich mit der Realisierung eines neuen Kryostatmoduls für den Injektor, das die Erhöhung von Maximalenergie und Strahlstrom durch ein neues Konzept für die Einkopplung der Hochfrequenzleistung über Hohlleiter ermöglicht. Im folgenden Kapitel werden zunächst der S-DALINAC und der Aufbau seiner Kryostatmodule erläutert und die Anforderungen an den neuen Injektor-kryostaten vorgestellt und begründet. In Kap. 3 wird die neue Konstruktion vorgestellt, deren Komponenten in Kap. 4 genauer betrachtet werden. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Herstellung neuer supraleitender Kavitäten. Die Montage des Moduls und die Ergebnisse erster Messungen daran außerhalb des Beschleunigers bei 2 und 4 Kelvin werden in Kap. 6 vorgestellt.



## 2 Anforderungen an den neuen Injektor des S–DALINAC

Zu Beginn dieses Kapitels wird der supraleitende Darmstädter Elektronenlinearbeschleuniger S–DALINAC vorgestellt. Danach werden zum weiteren Verständnis die supraleitenden Beschleunigungsstrukturen und der Aufbau der derzeit verwendeten Kryostatmodule beschrieben. Zum Schluss folgt die Motivation zur Neuentwicklung eines Kryostatmoduls für den Injektor, sowie eine Erläuterung der Anforderungen und Randbedingungen, die dabei erfüllt bzw. berücksichtigt werden mussten.

### 2.1 S-DALINAC

Der S–DALINAC besteht aus zwei Elektronenquellen, einer normalleitenden Chopper/Prebunchersektion, dem supraleitenden Injektor und Hauptbeschleuniger sowie zwei Rezirkulationen. Abbildung 2.1 zeigt eine schematische Darstellung des Beschleunigers. Die Strahlführung beginnt mit der thermionischen Quelle, in der ein kontinuierlicher Elektronenstrahl aus einer Kathode emittiert und auf 250 keV elektrostatisch vorbeschleunigt wird. Die Quelle zur Erzeugung spinpolarisierter Elektronen befindet sich oberhalb der Strahlführung und liefert mit Hilfe von Photoemission einen kontinuierlichen oder gepulsten 100 keV Elektronenstrahl. Je nach verwendeter Kathode und Lasertyp kann ein Polarisationsgrad von bis zu 86% erreicht werden. Mit Hilfe eines Alpha-Magneten ist es möglich die Elektronen in die horizontale Strahlführung zu injizieren. Im Anschluss bereiten die normalleitenden Chopper- und Prebuncherkavitäten den Elektronenstrahl für die Beschleunigung im Hochfrequenzfeld der supraleitenden Kavitäten vor, indem sie zuerst Elektronenpakete von 30 ps ausschneiden und diese dann auf 5 ps komprimieren.

Der Injektorkryostat besteht aus zwei miteinander verbundenen Kryostatmodulen. Im Ersten befinden sich eine 2-zellige [22,23] und eine 5-zellige Niob-Kavität. Der Zweizeller ist dabei für eine Elektronengeschwindigkeit von  $\beta = 0.85$ , der Fünzfeller und die 20-zelligen Strukturen sind für  $\beta = 1$  ausgelegt. Hinter den

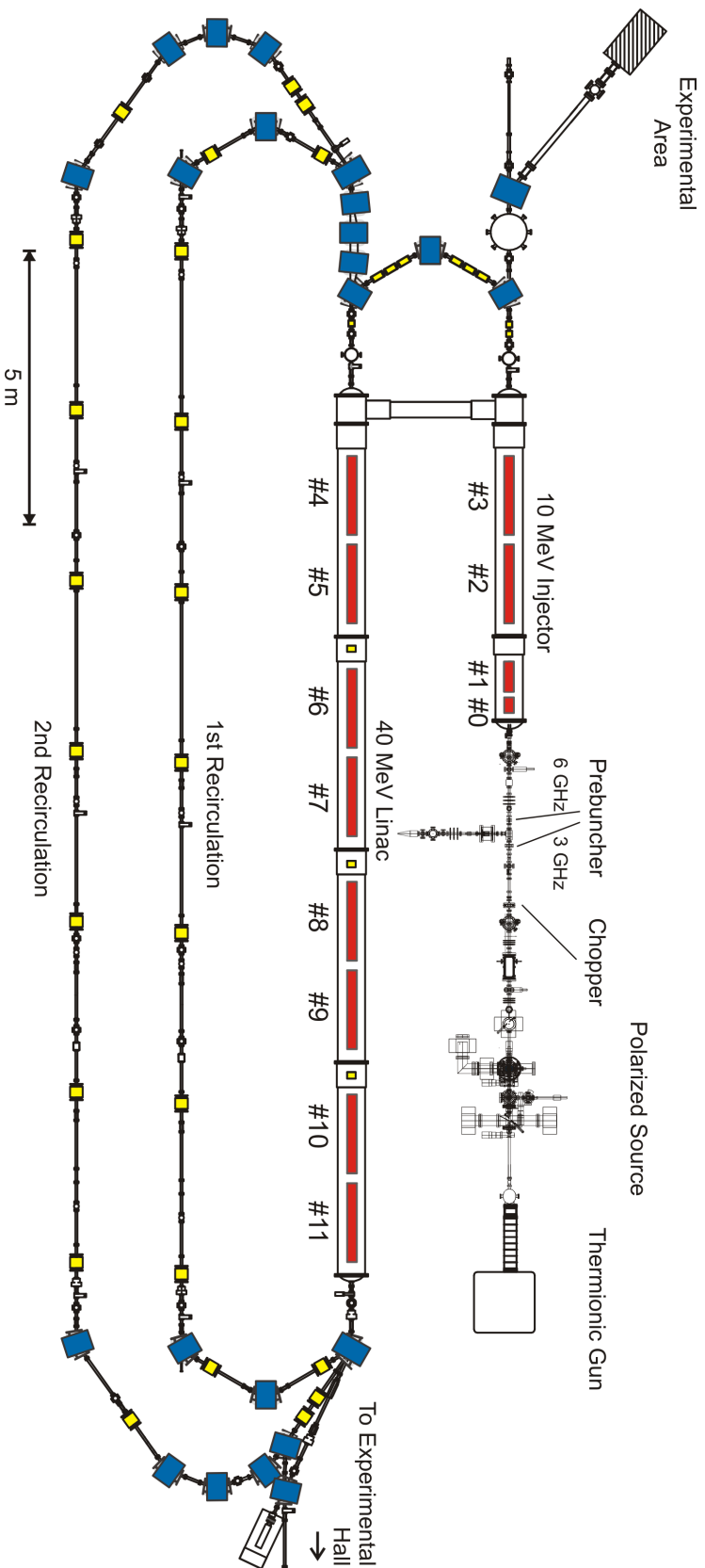


Abb. 2.1: Schematischer Grundriss des S-DALINAC. Entnommen aus [24].

beiden Einfangstrukturen haben die Elektronen mit  $\beta \approx 0.94$  annähernd Lichtgeschwindigkeit erreicht und können im zweiten Kryostatmodul, das baugleich mit den vier Linac-Modulen ist, weiter beschleunigt werden. Jedes dieser Kryostatmodule verfügt über zwei 20-zellige Niobkavitäten, welche jeweils für einen Energiegewinn von 5 MeV ausgelegt sind. Somit hat der Elektronenstrahl nach dem Injektor eine Energie von bis zu 10 MeV. Er kann nun wahlweise über einen 180°-Bogen in den Hauptbeschleuniger eingeschossen oder am Injektormessplatz DHIPS für Experimente genutzt werden. Die vier Kryostatmodule, die den Hauptbeschleuniger bilden, erlauben durch ihre acht 20-zelligen Kavitäten einen Energiegewinn von bis zu 40 MeV pro Durchlauf. Mit Hilfe der zwei Rezirkulationen ist es somit möglich Energien von 130 MeV zu erreichen. Der Strahl kann danach extrahiert und in die angeschlossene Experimentierhalle geführt werden.

Die supraleitenden Niob-Kavitäten werden in einem Bad aus suprafluidem Helium bei einer Temperatur von 2 Kelvin mit einer Frequenz von 2.997 GHz betrieben. Ein Heliumverflüssiger sorgt für eine Kälteleistung von 120–140 W. Die Betriebstemperatur von 2 K wird mit Hilfe von vier großen Pumpstandsmodulen erreicht, die den Gasdruck im Heliumbad auf 35 mbar reduzieren.

## 2.2 Beschleunigungsstrukturen

Die eigentliche Beschleunigung der Elektronen am S-DALINAC erfolgt in supraleitenden Hohlraumresonatoren durch Hochfrequenzfelder. Abbildung 2.2 zeigt eine solche 20-zellige Standardkavität, wie sie am S-DALINAC im Einsatz sind. Sie bestehen aus elliptischen Zellen und werden mit der  $\pi$ -Mode des ersten Passbandes ( $\text{TM}_{010}$ ) bei einer Frequenz von 2.997 GHz betrieben. Mit einer Zellenlänge von 5 cm sind die fünf- und 20-zelligen Strukturen somit optimal für eine Beschleunigung von Elektronen mit Lichtgeschwindigkeit geeignet. Die 2-zellige Einfangstruktur ist dagegen mit 4.25 cm Zellenlänge für  $\beta = 0.85$  ausgelegt. Über sogenannte cut-off-Rohre erfolgt die Ein- und Auskopplung der HF-Leistung. Die Beschleunigungsfeldstärke soll für alle Kavitäten 5 MV/m betragen. Dieser Wert konnte jedoch schon mit einigen Strukturen übertroffen werden [25]. Die Kavitäten werden in suprafluidem Helium bei einer Temperatur von 2 K betrieben

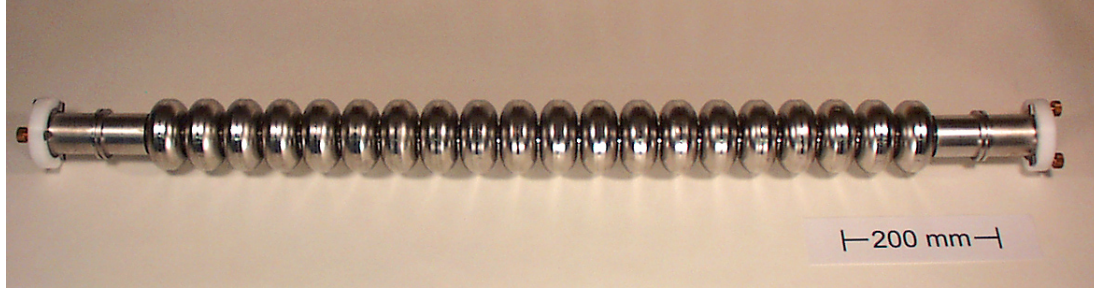


Abb. 2.2: 20-zellige S-DALINAC Beschleunigungsstruktur. An der ersten und letzten Zelle ist ein sogenanntes cut-off-Rohr angebracht.

und sind aus Niob mit einem RRR-Wert von 280 gefertigt. Dieser Wert (Residual Resistivity Ratio) stellt die Reinheit des Niobs als Verhältnis des spezifischen elektrischen Widerstandes bei Temperaturen von 300 K und 4.2 K dar. Tabelle 2.1 fasst alle wichtigen Designparameter der S-DALINAC-Kavitäten zusammen.

In einer einzelnen elliptische Zelle können eine Vielzahl von Moden angeregt werden. Die Mode mit der niedrigsten Frequenz bezeichnet man dabei als Grundmode. Sie ist in diesem Fall die  $TM_{010}$ -Mode und zeichnet sich dadurch aus, dass sie ein ausschließlich longitudinales elektrisches Feld besitzt, während die magnetischen Feldlinien konzentrische Kreise um die Strahlachse bilden. Die magnetische

Tab. 2.1: Designparameter der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen.

Material	Niob (RRR = 280)		
Frequenz	2.997 GHz		
Mode	TM <sub>010</sub> , $\pi$		
Temperatur	2 K		
Zellenzahl	20	5	2
Länge	1 m	0.25 m	0.085 m
Phasengeschwindigkeit $\beta$	1	1	0.85
Unbelastete Güte $Q_0$	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$2.4 \cdot 10^9$
Beschleunigungsfeld $E_{acc}$	5 MV/m		
Verlustleistung $P_0$ bei 5 MV/m	4.2 W	1.05 W	0.5 W

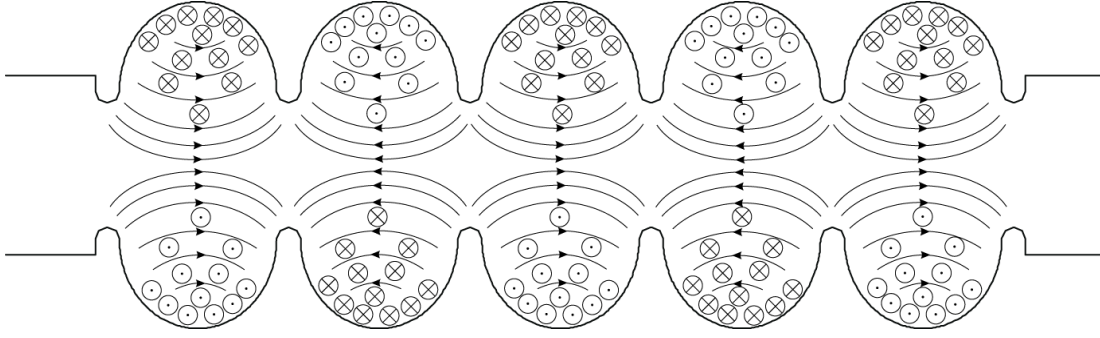


Abb. 2.3: Qualitative Feldverteilung der  $\pi$ -Mode des  $\text{TM}_{010}$ -Passbandes am Beispiel einer 5-zelligen Beschleunigungsstruktur.

Feldstärke ist dabei auf der Achse gleich null und nimmt mit wachsendem Radius nach außen hin zu. Bei richtig gewählter Eintrittsphase kann ein Elektron somit optimal im elektrischen Feld beschleunigt werden, ohne dass es durch Magnetfelder eine transversale Ablenkung erfährt.

In mehrzelligen Beschleunigungsstrukturen koppeln  $N$  einzelne Zellen über Irisblenden miteinander. Dies führt dazu, dass sich zu jeder fundamentalen Mode ein Passband mit  $N$  Moden ausbildet. Im Falle einer 20-zelligen Kavität erstreckt sich dieses Passband mit seinen 20 Resonanzen über ca. 120 MHz. Die Resonanz mit der höchsten Frequenz liegt im Betrieb bei 2.997 GHz und wird als  $\pi$ -Mode bezeichnet. Diese Bezeichnung wird aufgrund der Tatsache gewählt, dass die Phasenverschiebung von Zelle zu Zelle genau  $180^\circ$  beträgt. Abbildung 2.3 zeigt anhand einer 5-zelligen Struktur die Verteilung von elektrischem und magnetischem Feld der  $\pi$ -Mode. Der  $\pi$ -Mode benachbart ist bei einem 20-Zeller die  $19\pi/20$ -Mode. Ihre Resonanzfrequenz liegt nur ca. 1 MHz tiefer und hat einen Vorzeichenwechsel weniger, weswegen mit ihr keine effektive Elektronenbeschleunigung möglich ist.

## 2.3 Kryostatmodule

Der S-DALINAC ist aus fünf baugleichen Kryostatmodulen [26] aufgebaut. Im Wesentlichen besteht ein solches Modul aus zwei zylindrischen Behältern aus Edelstahl. Das innere Gefäß bezeichnet man als Heliumtank. In ihm sind jeweils zwei der 20-zelligen supraleitenden Beschleunigungsstrukturen zusammen mit ihren Frequenz-Abstimmvorrichtungen und Hochfrequenz-Ein- und Auskopplern untergebracht. Zwischen dem Heliumtank und der äußeren Kryostathülle wird zur Vermeidung von Wärmetransport durch Konvektion mit Hilfe von Turbomolekularpumpen ein Isoliervakuum in der Größenordnung  $10^{-5}$  mbar hergestellt. Um Verluste durch Wärmestrahlung zu minimieren befindet sich zwischen den beiden Tanks ein Aluminiumzylinder, welcher mit Hilfe von flüssigem Stickstoff gekühlt wird und somit einen Strahlungsschild darstellt. Zusätzlich sind Heliumtank und Stickstoffschild von mehreren Lagen Superisolation umschlossen. Zur Minimierung des Wärmeflusses wird der Stickstoffschild mittels dünnwandiger Edelstahlröhrchen an der Außenhülle aufgehängt und ausgerichtet. Auf ähnliche Art und Weise ist auch der Heliumtank am Stickstoffschild befestigt. Auch alle Transferleitungen bestehen aus dünnwandigen Rohren mit Wandstärken von maximal 1.5 mm und Wellbälgen, bei denen die Materialdicke lediglich 0.2 mm beträgt. Neben den Durchführungen in der Turmsektion gibt es zwei weitere am Heliumtank. Eine kann für zusätzliche Sensorik, wie Druck- oder Heliumniveaumessung verwendet werden, die andere wird mit einem Sicherheitsventil versehen um Schäden durch Überdruck zu vermeiden. Abbildung 2.4 zeigt eine Schnittansicht der Hälfte des Kryomoduls.

Darauf zu erkennen ist auch die Hochfrequenz-Verbindung, welche in Abb. 2.5 nochmals vergrößert zusammen mit dem Einkoppler [27] dargestellt wird. Es handelt sich um eine koaxiale 7/8"-Leitung aus verkupferten Edelstahl, die mit Hilfe einer Helicoflex-Metallichtung an den Einkoppler im Heliumbad angeschlossen wird. Die Hülle des Einkopplers ist aus Edelstahl gefertigt, die innere Verkleidung und das Koppelrohr, das in das cut-off-Rohr der Kavität ragt, bestehen aus Niob.

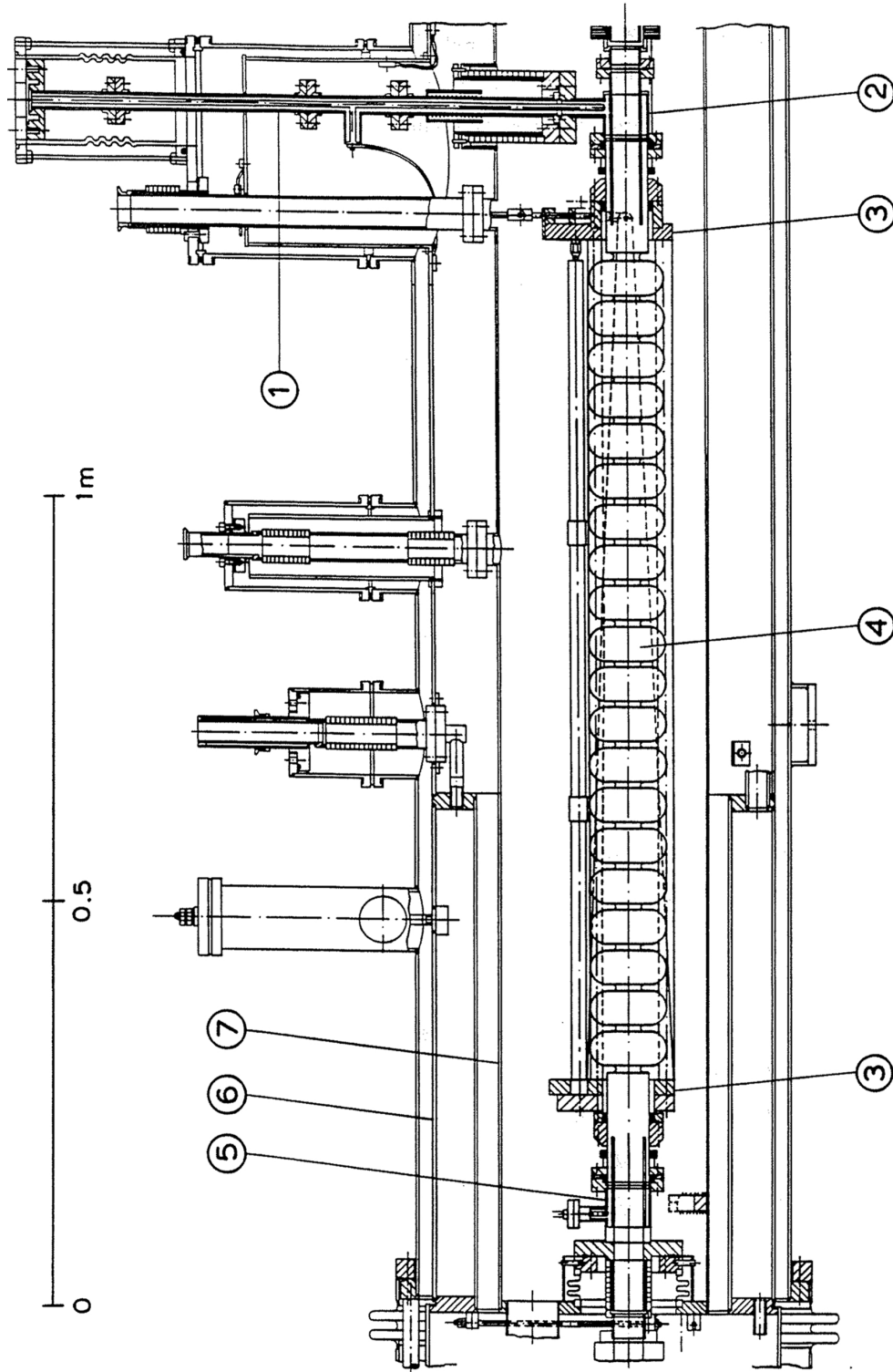


Abb. 2.4: Standard-Kryostatmodul des S-DALINAC. Dargestellt ist die Schnittansicht eines halben Moduls, welches weitgehend spiegelsymmetrisch aufgebaut ist. Zu erkennen sind die koaxiale 7/8" Einkoppelleitung (1), Einkoppler (2), Tuner (3), Beschleunigungsstruktur (4), Auskoppler (5), Stickstofftank (6), Heliumtank (7). Entnommen aus [27].

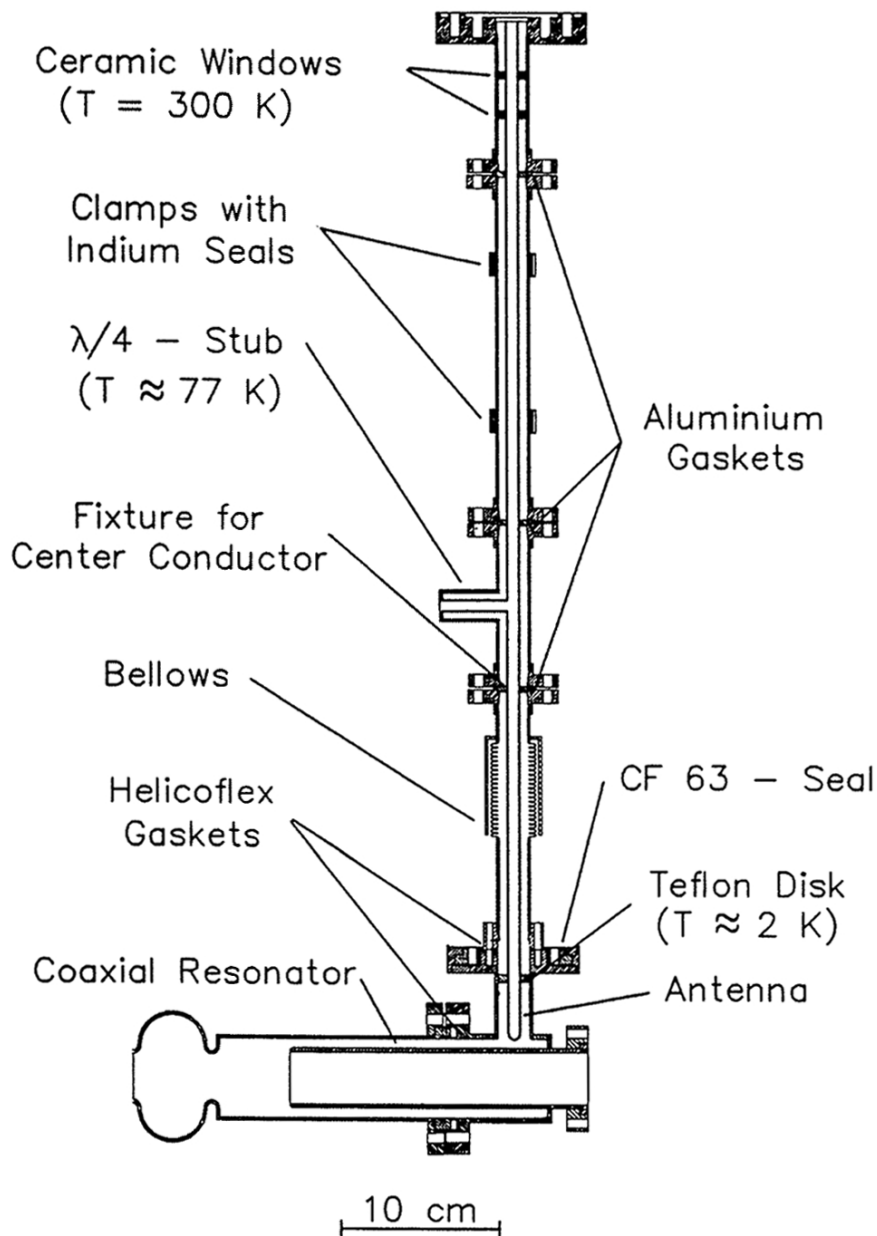


Abb. 2.5: Schematische Darstellung des HF-Einkoppelsystems am S-DALINAC.

Zu erkennen ist die 7/8"-Zuleitung, die über einen Wellbalg gestreckt oder gestaucht werden kann, um damit den Abstand des Innenleiters zum Rohr des Einkopplers zu variieren. Ebenfalls ist dargestellt, wo der Einkoppler über eine CF 63 Dichtung mit dem Heliumtank abschließt. Der Einkoppler wiederum ist mit je einer Helicoflex Dichtung mit dem cut-off-Rohr der Kavität und der Einkoppelleitung verbunden. Entnommen aus [27].



## 2.4 Neue Einkoppler

Die bisherigen am S-DALINAC verwendeten, coaxialen Einkoppler sind für eine Hochfrequenzleistung von maximal 500 W ausgelegt. Dies begrenzt am Injektormessplatz den Strahlstrom auf  $60\ \mu\text{A}$  bei 10 MeV. Um höhere Ströme und Energien zu ermöglichen, musste die maximal einkoppelbare Hochfrequenzleistung erhöht und deshalb ein neuer Einkoppler für die höheren Leistungen realisiert werden. Ein solcher wurde am Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder an der Technischen Universität Darmstadt entworfen [28]. Wie beim Vorgängermodell mussten dabei transversale Felder auf der Strahlachse vermieden werden. Dafür wird die HF-Leistung über einen coaxialen Zwischenresonator in die Kavität eingekoppelt, so dass sich die Anregung transversaler elektromagnetischer Felder auf weniger als  $-40\ \text{dB}$  reduziert. Dies ist besonders bei den niedrigen Strahlenergien im Injektor des S-DALINAC entscheidend. In Abb. 2.6 ist zu erkennen, wie die Übertragung der elektromagnetischen Leistung über das Koppelrohr des Einkopplers im cut-off-Rohr der Kavität realisiert wird. Auf diese Weise können Hochfrequenzleistungen von bis zu 2 kW eingespeist werden. Die externe Güte wurde mit  $5 \cdot 10^6$  an die zu erwartenden höheren Strahlleistungen angepasst. Die Herstellung, inklusive des Elektronenstrahlschweißens, übernahm

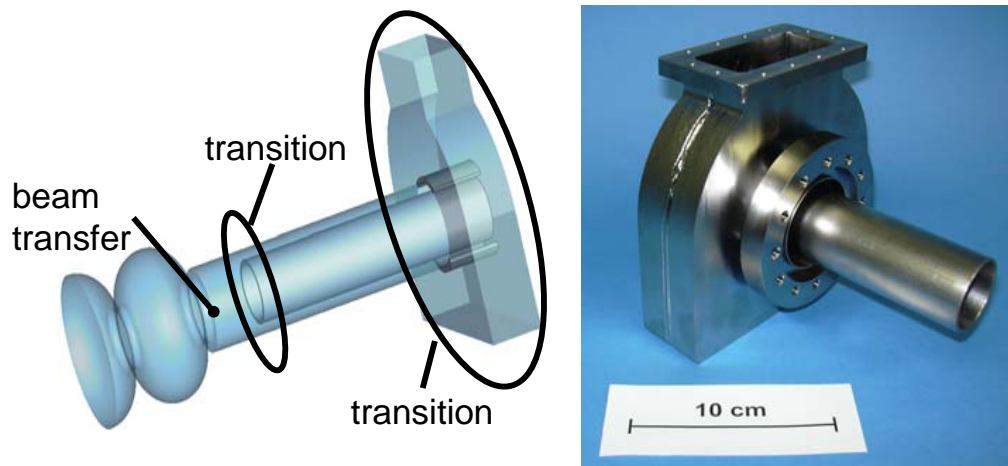


Abb. 2.6: Entwurf (links, entnommen aus [28]) und fertiger Einkoppler (rechts) für den neuen Injektorkryostaten. Entworfen wurde er am Institut für Theorie Elektromagnetischer Felder. Die Fertigung aus Niob erfolgte am Forschungszentrum Jülich.

das Forschungszentrum Jülich. Insgesamt wurden drei Koppler gefertigt. Bis auf den Verbindungsflansch zur Beschleunigungsstruktur, der aus Niob-Titan besteht, wurden die Einkoppler komplett aus Niob gefertigt und zum Abschluss einer chemischen Behandlung mit einem Abtrag von ca. 40  $\mu\text{m}$  unterzogen.

In Abb. 2.6 ist auch zu erkennen, dass die Versorgung des Einkopplers mit Hochfrequenzleistung nicht mehr über eine koaxiale Leitung, sondern über einen Rechteckhohlleiter<sup>1</sup> erfolgt, der bei 2 K in den Heliumtank geführt wird. Der hierfür erforderliche Raum steht in den Kryostatmodulen des S-DALINAC nicht zur Verfügung, so dass eine vollständige Neuentwicklung eines Kryostatmoduls erforderlich war. Dieses musste das bisherige Modul im Injektor ersetzen und dafür die gleiche Länge besitzen. Auch war die Kompatibilität der Anschlüsse für Strahl- und Isoliervakuum, flüssigen Stickstoff sowie flüssiges und gasförmiges Helium, sowohl auf Strahleintritts- als auch auf Strahlaustrittsseite unabdingbare Voraussetzung für das Modul. Zu diesen Randbedingungen kamen die folgenden Anforderungen:

- Das Kryostatmodul musste zwei 20-zellige Beschleunigungsstrukturen mit den neuen Einkopplern, Rechteckhohlleiterzuführungen für 2 kW HF Leistung, Frequenzabstimmvorrichtungen und HF-Auskopplern aufnehmen können. Dafür musste die Turmsektion vollkommen neu ausgelegt und flexible, rechteckige Hohlleiterkomponenten entwickelt werden.
- Die statischen, thermischen Verluste an das Heliumbad sollten für das neue Kryostatmodul einen Wert von 6 W nicht überschreiten. Dies stellte insbesondere für die Hohlleiterbauteile eine große Herausforderung dar. Aufgrund des größeren Querschnitts gegenüber der koaxialen HF-Leitung bei den Standardmodulen, musste ein Blendenelement entworfen werden, das die innerhalb der Hohlleiterverbindung propagierende Wärmestrahlung absorbiert bzw. reflektiert.
- Um maximale Beschleunigungsfeldstärken bei tolerabler HF-Verlustleistung zu erreichen, sollten insgesamt drei neue Beschleunigungsstrukturen nach neuestem Stand der Technik hergestellt und einer verbesserten Präparation unterzogen werden. Zusätzlich war im Bereich der Einkoppler ein deutlich

---

<sup>1</sup>WR-284. Innere Abmessungen:  $72.1 \times 34 \text{ mm}^2$

vergrößerter Freiraum für die Montage erforderlich, um eine saubere Installation unter Reinraumbedingungen zu ermöglichen. Ebenso musste eine verbesserte magnetische Abschirmung für den Heliumtank realisiert werden, um sicherzustellen, dass die magnetische Flußdichte im Bereich der supraleitenden Kavitäten unterhalb von  $5 \mu\text{T}$  liegt. Diese Maßnahmen sollten das Erreichen von unbelasteten Güten  $Q_0 \geq 2 \cdot 10^9$  für die Beschleunigungsstrukturen sicherstellen, so dass deren Einsatz bei Feldstärken von bis zu  $7 \text{ MV/m}$  problemlos möglich ist.

In den folgenden Kapiteln werden die Maßnahmen im Detail vorgestellt, die notwendig waren, um die Anforderungen unter den oben genannten Randbedingungen zu erfüllen.

# 3 Konzeption des neuen Beschleunigerkryostaten

Bei der Auslegung des neuen Kryostatmoduls mussten mehrere Aspekte im Auge behalten werden. Aufgrund der neuen Einkoppler und der daraus resultierenden WR-284 Rechteckhohlleiterverbindung musste vor allem die sogenannte Turmsektion vergrößert werden. Dies war unabdingbar, damit alle notwendigen Komponenten Platz finden und gleichzeitig genügend Raum vorhanden ist, um alle erforderlichen Montagearbeiten durchführen zu können. Gleichzeitig mussten Stabilität und Vakuumkräfte, sowie die thermische Kontraktion beim Abkühlen und der Wärmeeintrag ins Heliumbad berücksichtigt werden. Dieses Kapitel stellt die verschiedenen Aspekte der neu entwickelten Konstruktion vor.

## 3.1 Vorbemerkungen

Um die am Ende des vorigen Kapitels formulierten Randbedingungen erfüllen zu können, wurde für die Enden des neuen Kryostatmoduls (Strahlein- und Strahlaustrittsseite) der bisherige Entwurf (Abschn. 2.3) als Grundlage verwendet. Die neuen Einkoppler müssen deshalb an der gleichen Stelle wie vorher, also in der Mitte des Moduls, montiert werden. Abbildung 3.1 zeigt die neuen Einkoppler betrachtet durch die größtmöglichen Standardflasche für den Heliumtank und die Außenhülle. Wie man erkennen kann, ist dies keine praktikable Lösung, da der Ansatz für den Rechteckflansch des Einkopplers nur zum Teil unter der runden Öffnung liegt. Aufgrund der niedrigen Höhe wurden auch erste Überlegungen ein Hohlleiterversatzstück einzusetzen verworfen. Außerdem gab es noch Probleme, die Motorwelle für die Abstimmvorrichtung der Kavitäten nach außen zu führen, da deren Anschluss auch zur Hälfte unterhalb des Flanschs liegt. Da Standardflanschgrößen somit ausgeschlossen waren, wurde stattdessen zunächst eine große rechteckige Öffnung gewählt [29], um maximalen Platz bei der Montage zu bieten. Abbildung 3.2 zeigt eine 3-D Schnittansicht dieses ersten Entwurfs. Es folgten Überlegungen zu möglichen Durchführungen für die Hohlleiter und Stressanalysen der Konstruktion. Nach Auswertung der Ergebnisse dieser Analysen, deren

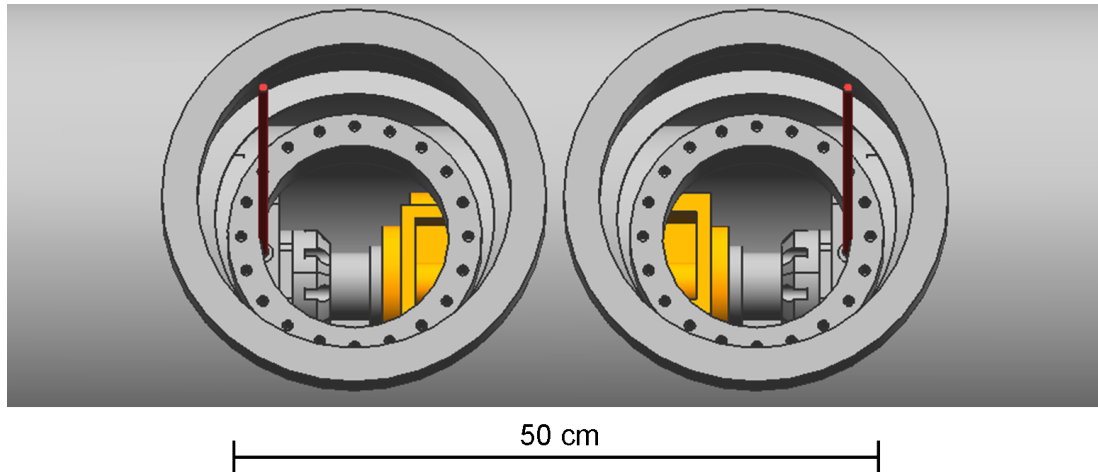


Abb. 3.1: 3-D Ansicht des Moduls in einer ersten Version mit runden Standardflanschen. Man erkennt, dass die Flansche der neuen Einkoppler und der Ansatz der Motorwelle teilweise durch die Flansche verdeckt sind.

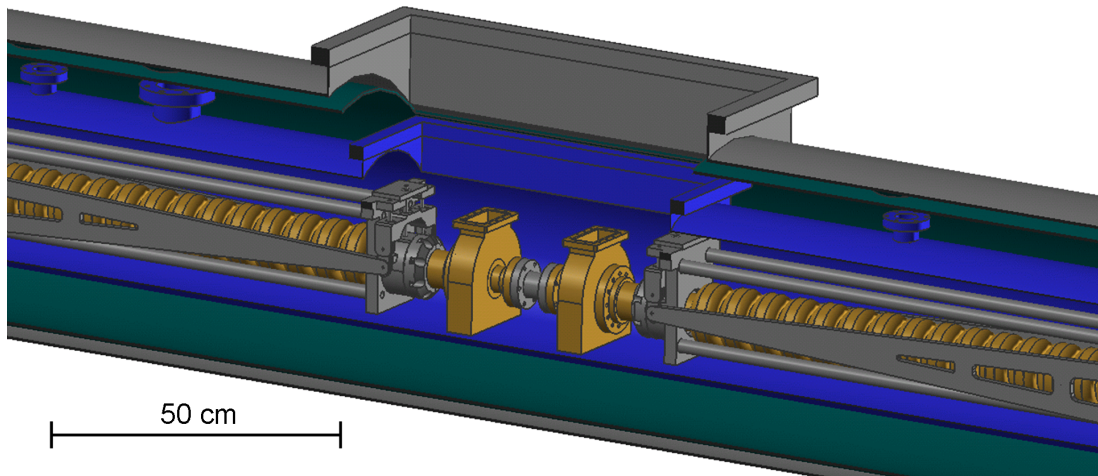


Abb. 3.2: 3-D Schnittansicht eines frühen Entwurfs mit rechteckiger Öffnung [29]. Zu erkennen sind Kavitäten und ihre Einkoppler (gelb), der Heliumtank (blau), der Stickstoffschild (grün) und die äußere Hülle (grau).

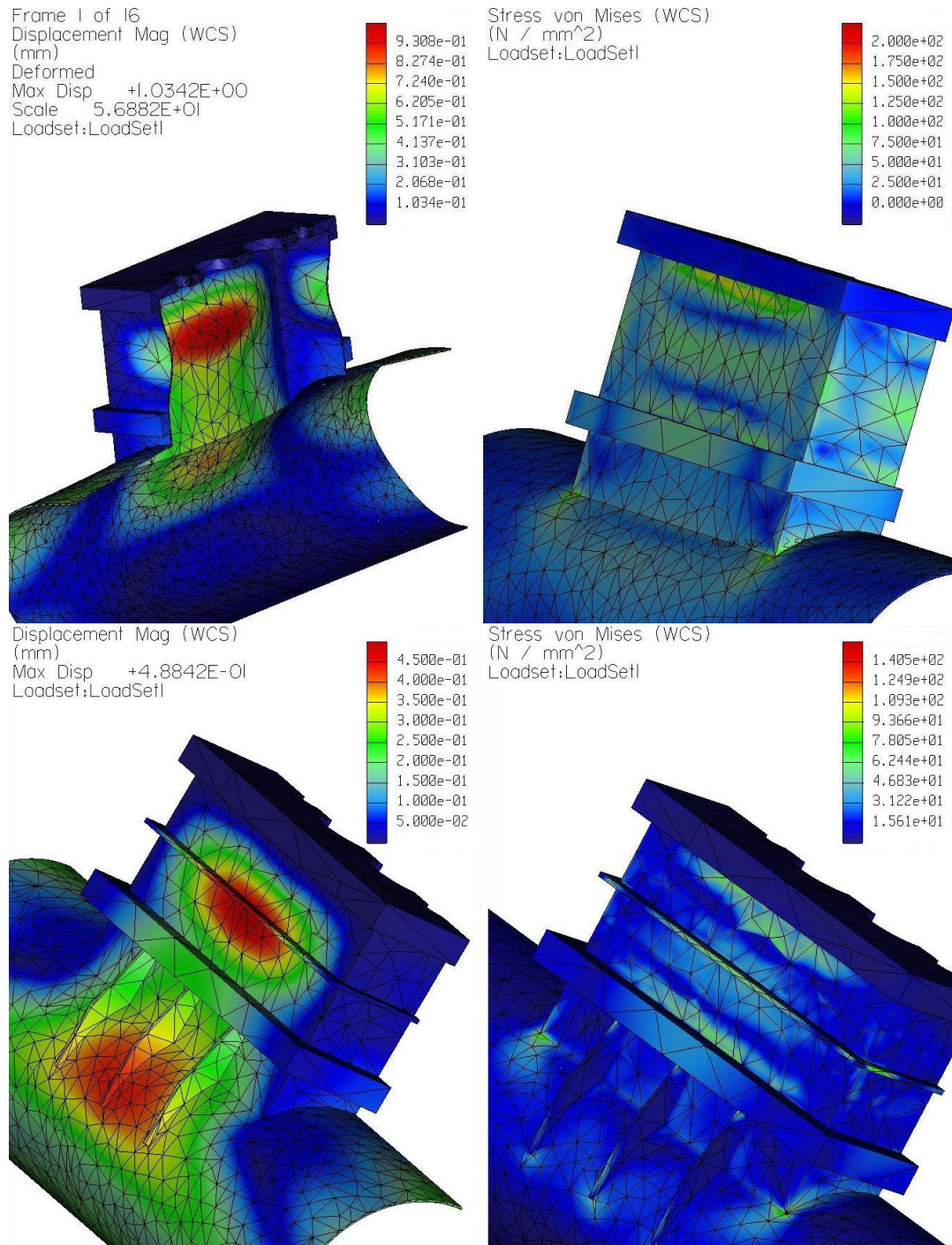
Durchführung und Ergebnisse im nächsten Abschnitt diskutiert werden, und einer genauen Untersuchung des zum Zusammenbau benötigten Platzes, wurden schließlich noch die rechteckigen Öffnungen von Heliumtank und Kryostathülle abgerundet, so dass sich für die endgültige Umsetzung eine Stadionform ergab.

## 3.2 Mechanische Stabilität der Druckbehälter

Nachdem geklärt war, wie groß und wie hoch die Turmsektion werden muss, damit die inneren Komponenten montiert werden können, wurde dieser zentrale, neugestaltete Teil des Moduls auf mechanische Stabilität überprüft. Die Untersuchung der Konstruktion auf mögliche mechanische Schwachstellen führte J. Fuerst, Argonne National Laboratory (ANL), mit Hilfe eines Analyseprogramms durch. Abbildung 3.3 zeigt die Ergebnisse einer solchen Simulation für die Kryostathülle bei 1 bar Druckdifferenz. Dies entspricht den Einsatzbedingungen, wenn das Isoliervakuum gepumpt ist. Dabei wurden die Belastungen und die Deformation der Oberfläche untersucht. Für den ersten Entwurf, in welchem die Wände des Turms genau wie der übrige Kryostatzyylinder eine Materialstärke von 4 mm hatten, ergab sich eine maximale Deformation von ca. einem Millimeter in der Mitte des Turms. Der untere Teil von Abb. 3.3 zeigt, wie diese Deformation auf 0.5 mm reduziert werden kann, indem zusätzliche Verstärkungen auf halber Höhe und im Sockelbereich des Turms angeschweißt werden. Noch wichtiger als die Reduktion der Deformation ist jedoch die Tatsache, dass so die maximalen Belastungen auf etwa die Hälfte reduziert werden konnten.

Eine ähnliche Analyse wurde für den Heliumtank durchgeführt, wobei hier von einer maximalen Druckdifferenz von 1 und 2 bar ausgegangen wurde. Die Ergebnisse dieser Untersuchung führten dazu, dass die Wandstärke des Turms am Heliumtank von 2 mm auf 5 mm erhöht werden musste, wodurch auch im höchst unwahrscheinlichen Notfallszenario von 2 bar Druckdifferenz die mechanische Stabilität gewährleistet bleibt. Die Sicherheitsventile am S-DALINAC lösen bei 1.3 bar Atmosphärendruck aus und sorgen so für eine Entlastung der Heliumtanks.

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, wurde als letzte Maßnahme der Turm nicht rechteckig sondern, wie in den folgenden Abschnitten gezeigt, stadionförmig auslegt. Durch diese vakuumtechnisch günstigere Konstruktion konnte die mechanische Stabilität nochmals erhöht werden.



**Abb. 3.3:** Falschfarbendarstellung der Ergebnisse einer Stressanalyse [30]. Die Berechnung wurde für eine Druckdifferenz von 1 bar sowie für Edelstahlwände mit einer Stärke von 4 mm durchgeführt. Gezeigt sind jeweils links die Ergebnisse für die Deformation der Kryostathülle in mm, rechts für ihre Belastung in N/mm<sup>2</sup>. Oben ist die Ausgangssituation gezeigt, unten die Verbesserung durch zusätzliche Versteifungen.

### 3.3 Hohlleiterdurchführung

Einen entscheidenden Schritt bei der Neuauslegung des Kryostatmoduls stellt die Durchführung der Hohlleiter vom Typ WR-284 von außen bis zum Einkoppler bei 2 K dar. Das Konzept beinhaltet kein „kaltes“ HF-Fenster bei 2 K, es ist nur ein Fenster direkt oberhalb des Kryostaten bei Raumtemperatur vorgesehen. Der gesamte Innenraum der Hohlleiter unterhalb dieses Fensters gehört also zum Bereich des Strahlvakuums, wie in. Deren innere Oberflächen und die hier eingesetzten Dichtungen müssen deshalb Ultrahochvakuum (UHV) Ansprüchen genügen. Die speziell hierfür entwickelten Hohlleiterkomponenten werden im Folgenden beschrieben.

Abbildung 3.4 zeigt eine beschriftete Schnittansicht der Turmsektion. Darauf ist auch die Anbindung der Transferleitung an den Stickstoffschild zu erkennen, die erforderlich ist um den Wärmeeintrag in den Heliumtank zu minimieren. Die Wärmeverluste werden in Abschn. 3.5 ausführlich diskutiert. Im untersten Abschnitt wird ein gerades Hohlleiterstück vakuumdicht mit dem Einkoppler verbunden. Die Länge dieses Bauteils wurde so gewählt, dass genügend Platz zum Anbringen der Schrauben an den Einkopplern bleibt. Der Flansch am oberen Ende verfügt in der Mitte über die nötigen M4-Gewindesacklöcher um das nächste WR-284 Bauteil anzubringen. Darum kreisförmig angeordnet befinden sich M6-Gewindesacklöcher um eine außenliegende Dichtung zu verpressen, die dieses Bauteil von innen gegen den Deckel des Heliumtanks abdichtet. Hierfür konnte eine Standarddichtung vom Typ Helicoflex verwendet werden. Der Gegenflansch ist an einen Membranbalg geschweißt, der wiederum an den stadionförmigen Flansch des Heliumtanks geschweißt ist. Die Löcher für die Schrauben der Größe M6 im Gegenflansch sind mit 8 mm Durchmesser übergroß ausgelegt. Zusammen mit dem Membranbalg ist es somit möglich, eventuelle Ungenauigkeiten in der Position auszugleichen. Da beim Pumpen des Heliumtanks für Lecktests oder beim späteren Pumpen des Isoliervakuums große Kräfte auf den Flansch wirken, werden nach dem Abdichten des Heliumtanks die Membranbälge mit Hilfe von jeweils drei Gewindestangen in ihrer Position fixiert, damit der Einkoppler kraftfrei bleibt. Abbildung 3.5 zeigt die Montage dieser Komponenten in einer 3-D Ansicht.

Nachdem die Hohlleiter so aus dem Heliumtank hinausgeführt sind, müssen sie



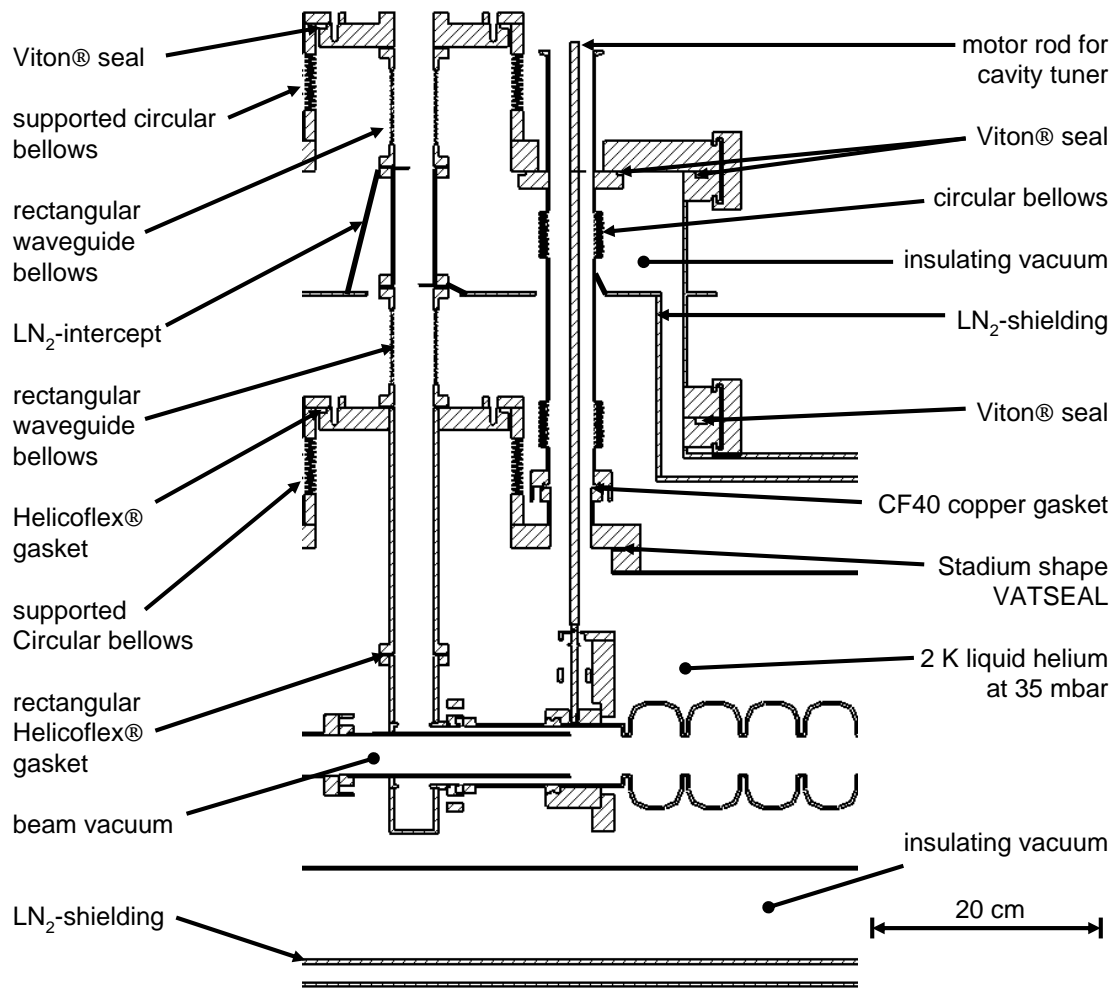


Abb. 3.4: Schnittansicht einer Turmhälfte. Zu sehen sind die Transferleitungen durch die verschiedenen Druckbereiche zusammen mit den Positionen der verschiedenen Dichtungen.

weiter durch den Bereich des Isoliervakuums nach außen geführt werden. Für diesen Bereich waren von Anfang an flexible Hohlleiter vorgesehen, da der Heliumtank beim Abkühlen schrumpft, die Außenhülle bei Zimmertemperatur jedoch ihre Form behält. Außerdem sorgen diese flexiblen Hohlleiter für zusätzlichen Spielraum bei der Montage und können einen kleinen lateralen Versatz ausgleichen. Da kein Hersteller für flexible Rechteckhohlleiter für Tieftemperatur- und UHV-Bedingungen gefunden werden konnte, wurde die Fa. Witzenmann, die auf die Herstellung von Metallbälgen spezialisiert ist, mit der Produktion von rechteckigen Edelstahlbälgen beauftragt. Diese wurden anschließend durch ein galvanisches Verfahren mit einer Kupferschicht versehen, um als Hohlleiter zu fungieren.

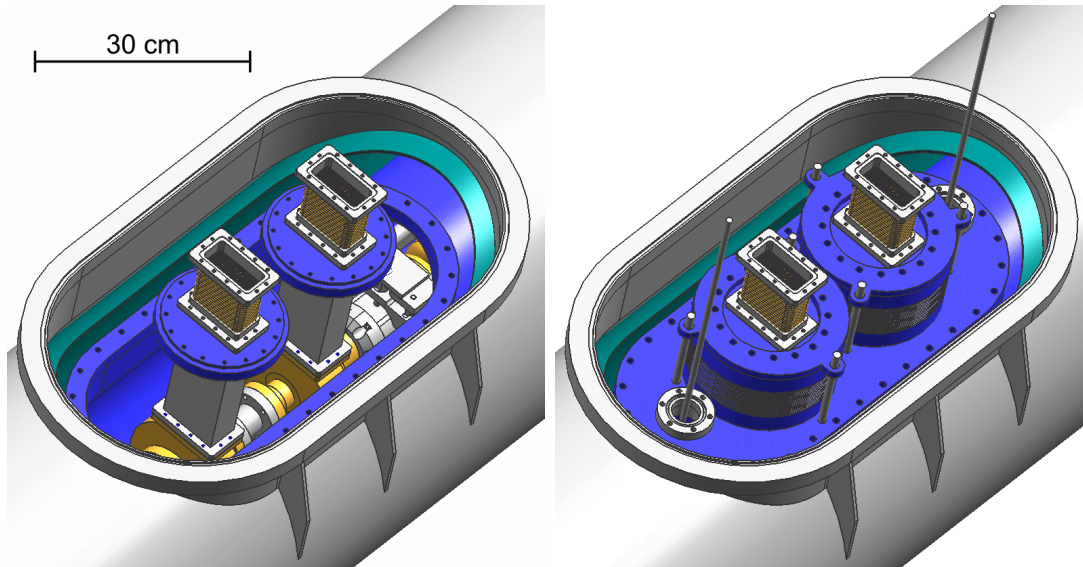


Abb. 3.5: Das linke Bild zeigt, wie zuerst die Hohlleiterkomponenten durch die stadionförmige Öffnung auf den Einkopplern montiert werden. Durch ihre äußeren Rundflansche erfolgt, wie im zweiten Bild gezeigt, das Abdichten des Heliumtanks. Der Heliumtankdeckel verfügt über entsprechende Gegenflansche an angeschweißten Membranbälgen. Dadurch ist eine flexible Montage möglich. Ebenfalls zu sehen sind die CF40 Öffnungen, die für die Transferleitungen der Motorwelle benötigt werden.

Eine Messung der HF-Eigenschaften dieser Bauteile folgt in Kap. 4. Insgesamt setzt sich die fertige Transferleitung zwischen Heliumtank und Kryostathülle aus zwei solchen Hohlleiterwellbälgen mit einer Länge von jeweils 101 mm und einem dazwischenliegenden starren, geraden Stück von ebenfalls 101 mm Länge zusammen. Am oberen Ende wird ein Durchgangsflansch, ähnlich der Durchführung am Heliumtank, verwendet, mit dem Unterschied, dass hier eine Gummidichtung (Viton) eingesetzt werden kann, um das Isoliervakuum abzudichten.

### 3.4 Transferleitung für Motorwelle und Elektrik

Auch im Entwurf für das neue Kryostatmodul waren eigene Durchführungen für Motorwelle und Kabel vorgesehen. Sie werden zusammen mit den koaxialen Kabeln, die mit den Auskopplern verbunden sind, ähnlich wie bei der bisherigen

Konstruktion in einem Edelstahlrohr durch das Isoliervakuum nach außen geführt. Dort werden die Motorwellen an vakuumdichte Drehdurchführungen und die Kabel an kommerzielle Vakuumdurchführungen angeschlossen. Der einzige Unterschied zum bisherigen System besteht darin, dass die Transferleitung nun über zwei angeschweißte Wellbälge verfügt, die mehr Flexibilität bei der Montage zulassen. Im ursprünglichen Entwurf sind die Rohre starr ausgeführt, nur der obere Abschlussflansch hat durch seine Aufhängung an einem Wellbalg etwas Spiel. Trotz direkter Verbindung zum Heliumtank befindet sich der obere Abschluss der Leitung auch beim kalten Modul auf Zimmertemperatur, da sich im Inneren eine Heliumsäule mit dem entsprechenden Temperaturgradienten bildet.

### 3.5 Abschätzung des Wärmeeintrags

Im Folgenden wird eine Abschätzung der thermischen Verluste des neuen Kryostatmoduls durchgeführt. Die Grundlage hierfür bilden die Erfahrungen aus dem Betrieb des Beschleunigers, durch die sich statische Verluste pro Kryostatmodul von ca. 4 W ergaben. Da sich die Konstruktion nur in der Turmsektion und dort insbesondere durch die Rechteckhohlleiterverbindungen geändert hatte, konnten die neuen statischen Verluste durch Berechnung dieser Komponenten auf Grundlage ihrer Geometrien abgeschätzt werden.

Die Temperaturabhängigkeit der thermischen Leitfähigkeit von Festkörpern kann bei der Berechnung des Wärmeeintrags nicht vernachlässigt werden. Die übertragene Leistung im stationären Zustand ergibt sich nach [31] zu

$$Q = \frac{-1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A(x)}} \left[ \int_{T_1}^{T_2} K(T) dT \right]. \quad (3.1)$$

Dabei ist  $K(T)$  die thermische Leitfähigkeit,  $A(x)$  die Querschnittsfläche,  $T_2$  die höhere und  $T_1$  die niedrigere Temperatur. In einer anderen Schreibweise lautet diese Gleichung:

$$Q = -G(\Theta_2 - \Theta_1) = -G \cdot \Delta\Theta, \quad (3.2)$$

wobei nur noch der Geometriefaktor

$$G = \frac{1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A(x)}} \quad (3.3)$$

zu berechnen ist und die Wärmeleitintegrale

$$\Theta_i = \int_0^{T_i} K(T) dT \quad (3.4)$$

aus der Literatur entnommen werden können.

Für die Berechnung des Wärmeeinfalls in den Stickstoffschild und in den Heliumtank durch die HF-Transferleitung wurden 100 K als konservative Abschätzung der Temperatur des an den Schild angebundenen Hohlleiters angenommen. Zwischen 300 und 100 K befindet sich ein Hohlleiterwellbalg von 101 mm Länge, wobei sich durch die Wellen eine effektive Gesamtlänge von 159 mm ergibt. Die Querschnittsfläche ist aufgrund der Anschlussstücke und Flansche nicht homogen für dieses Bauteil. Für die Berechnung des Geometriefaktors werden die dickeren Anschlusssteile und Flansche nicht berücksichtigt, da der eigentliche thermische Widerstand durch den auf 121 mm nur 0.2 mm dünnen Balgbereich gegeben ist. Mit  $\Delta\Theta \approx 2500$  W/m für Edelstahl zwischen 300 und 100 K beträgt der Wärmeeinfall 0.9 W. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit ( $\Delta\Theta \approx 80$  kW/m für den gleichen Temperaturbereich) muss der Beitrag der 10  $\mu\text{m}$  dünnen Kupferschicht ebenfalls berücksichtigt werden. Der Geometriefaktor hierfür errechnet sich über die komplette effektive Länge von 159 mm und resultiert in einem Beitrag von ca. 1 W. In der Summe bedeutet dies, dass Verluste durch Wärmeleitung an den Stickstoffschild durch die beiden Hohlleiterverbindungen mit 4 W nach oben abgeschätzt werden können.

Die Verbindung von 100 K zum Heliumbad besteht aus einem Balgsegment und einem 200 mm langen, starren Hohlleiterstück. Die Berechnung des Geometriefaktors für den Wärmeeintrag durch den Edelstahl berücksichtigt deshalb die unterschiedlichen Querschnittsflächen  $A_i$  auf den entsprechenden Längen  $l_i$  wie folgt:

$$G_{2-100K,Steel} = \frac{1}{\frac{l_1}{A_1} + \frac{l_2}{A_2}} \approx 0.33 \text{ mm} \quad (3.5)$$

Mit  $\Delta\Theta_{\text{Steel}, 2-100\text{ K}} \approx 500\text{ W/m}$  ergibt sich der Wärmeeintrag zu 0.2 W pro Leitung. Das Wärmeleitintegral für Kupfer im entsprechenden Temperaturbereich wird mit  $\Delta\Theta_{\text{Cu}, 2-100\text{ K}} \approx 70\text{ kW/m}$  angegeben. Der Geometriefaktor errechnet sich aus der Summe der beiden Bauteillängen und der Querschnittsfläche, die sich durch die 10  $\mu\text{m}$  dünne Kupferschicht ergibt. Die daraus berechnete Verlustleistung beträgt 0.4 W pro Hohlleiterverbindung.

Zu den statischen Verlusten durch Wärmeleitung müssen bei der neuen Konstruktion auch Verluste durch direkte Wärmestrahlung in den Heliumtank berücksichtigt werden, da durch die Hohlleiter nun eine direkte Sichtlinie von Bauteilen auf Raumtemperatur auf solche bei 2 K besteht. Die vom warmen Hohlleiterfenster an das Heliumbad abgestrahlte Leistung beträgt nach dem Boltzmannschen Strahlungsgesetz

$$Q = \epsilon \sigma A T^4 = \epsilon \cdot 1.1\text{ W}, \quad (3.6)$$

wobei für  $A$  die Querschnittsfläche des Hohlleiters eingesetzt wurde und  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}\text{ W/(m}^2\text{K}^4)$  die Boltzmannkonstante ist. Die Emissivität  $\epsilon$ , auch Emissionsgrad genannt, ist nicht nur material- und temperaturabhängig, sondern hängt zusätzlich noch von der Oberflächenbeschaffenheit ab. Leider konnte der Hersteller der Vakuumfenster keine genauen Angaben zu diesem Parameter machen. Das eigentliche Fenster besteht aus einer Aluminiumoxid-Keramik (Alumina 99.6%), deshalb wurde mit 0.9 für  $\epsilon$  ein typischer Wert für dieses Material angenommen, womit sich eine abgestrahlte Leistung von einem Watt pro Fenster ergibt. Ein Großteil dieser Leistung kann jedoch durch ein Blendenelement absorbiert bzw. reflektiert werden, das durch eine thermische Verbindung zum Stickstoffschild auf 100 K abgekühlt wird. Eine Skizze und die Beschreibung der Hochfrequenzeigenschaften dieses Bauteil folgt in Abschn. 4.3. Die Blenden decken ca. 75 % der Hohlleiterquerschnittsfläche ab wodurch ein entsprechender Anteil der Wärmestrahlung abgefangen wird. Die wiederum von den kalten Oberflächen abgestrahlten Leistungen fallen aufgrund der  $T^4$ -Abhängigkeit mit 10 mW nun kaum mehr ins Gewicht. Die resultierenden Verluste durch Strahlung in den 2 K Bereich pro Hohlleiter können somit auf 0.25 W abgeschätzt werden. Zusammen mit den oben berechneten Werten für die Konduktion ergeben sich die statischen Verluste durch die beiden neuen Transferleitungen zu maximal 1.7 W. Mit den übrigen statischen Verlusten des Moduls von ca. 4 W sollte der Wärmeeintrag in den Heliumtank nicht größer als 5.7 W sein.

Im Betrieb treten zusätzlich zu den oben genannten statischen auch noch dynamische Verluste aufgrund der eingekoppelten Hochfrequenzleistung auf. Die Abschwächung  $\alpha$  für einen WR-284 Hohlleiter beträgt nach [32]  $-0.02$  dB/m bei Raumtemperatur. Da der elektrische Widerstand mit der Temperatur abnimmt, sinkt die Abschwächung  $\alpha$  mit der Quadratwurzel des Verhältnisses der spezifischen Widerstände, so dass sich für Hohlleitersegmente, die sich auf einer Temperatur von 100 K bzw. 2 K befinden, die folgenden Abschwächungen ergeben:

$$\alpha_{100\text{K}} = -0.02 \text{ dB/m} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{100\text{K}}}{\rho_{300\text{K}}}} = -8.9 \cdot 10^{-3} \text{ dB/m} \quad (3.7)$$

$$\alpha_{2\text{K}} = -0.02 \text{ dB/m} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{2\text{K}}}{\rho_{300\text{K}}}} = -6.7 \cdot 10^{-4} \text{ dB/m} \quad (3.8)$$

Da die genaue Temperaturverteilung entlang des Hohlleiters von 100 K an der Position der Stickstoffschildanbindung bis zum Einkoppler bei 2 K nicht bekannt ist, wird vereinfachend angenommen, dass sich die erste Hälfte der Leitung komplett auf 100 K und der zweite Teil bei 2 K befindet. Demnach ergeben sich die dynamischen Verluste in den Heliumtank pro Leitung zu 0.6 W bei der maximalen Hochfrequenzleistung von 2 kW. Dies ist als obere Abschätzung zulässig, da  $\alpha$  zwischen 100 K und 2 K um mehr als eine Größenordnung fällt. Hinzu kommt, dass aufgrund der besseren Wärmeleitfähigkeit von Metallen bei höheren Temperaturen die Leistung eher in den Stickstoff dissipiert wird. Bei einem nicht angepassten Betrieb erhöht sich die dissipierte Leistung wegen der zusätzlichen Reflexion  $r = P_r/P_v$  um einen Faktor  $(1+r^2)$  maximal auf das Doppelte. Für den Betrieb des Kryostatmoduls im Beschleuniger stellen diese zusätzlichen Verluste jedoch kein Hindernis dar, da nur der Injektor mit dem neu entwickelten Kryostatmodul für 2 kW eingekoppelte Leistung ausgelegt ist und die Kapazität der Kälteanlage mit ihrer Leistung von 120 W für den reinen Injektorbetrieb mehr als ausreicht. Bei Betrieb mit rezirkuliertem Strahl werden weiterhin maximal 500 W Hochfrequenzleistung benötigt. In diesem Fall reduzieren sich auch die dynamischen Verluste im neuen Injektormodul um den Faktor 4.

## 3.6 Herstellung des Moduls

Das Modul wurde von der Fa. PVA TePla hergestellt. Abbildung 3.6 zeigt das Kryostatmodul nach der Fertigstellung. Man erkennt die Verstärkungen im Turmbereich und die Bälge am oberen Ende, durch die später die Hohlleiter nach außen geführt werden. Der Heliumtank wurde mit einer 2 mm dicken Lage Cryopermblech als magnetische Abschirmung ummantelt und anschließend mit 10 Lagen Superisolation<sup>2</sup> umgeben. Der Stickstoffschild wurde mit 40 Lagen umwickelt. Die Superisolation besteht aus aluminisierter Folie zur Reflexion von Wärmestrahlung mit einem „Spacer“-Material als Zwischenlage, um einen Abstand zwischen den Folien zu gewährleisten und gleichzeitig den Wärmeübertrag durch Konduktion zu minimieren. Das „Spacer“-Material besteht aus 100% Polyester und ist für ein minimales Ausgasen im Vakuum optimiert. Laut Herstellerangaben reduzieren die 10 Schichten um den Heliumtank den Wärmeeintrag durch Strahlung von 77 K zu 4 K auf  $24 \text{ mW/m}^2$  und die 40 Lagen zwischen 300 K und 77 K bewirken eine Reduktion auf  $0.65 \text{ W/m}^2$ . Durch diese Isolierung wird sichergestellt, dass die statischen Verluste des Kryostatmoduls in keinem Fall größer sein werden, als bei den bislang verwendeten Modulen.



Abb. 3.6: Das neue Kryostatmodul nach der Fertigstellung. Mit der Anschluss-  
haube zur Verbindung mit dem benachbarten Kryostaten besitzt es eine  
Gesamtlänge von 3.4 m.

---

<sup>2</sup>Coolcat 2 non-woven superinsulation. Hersteller: RUAG Space GmbH.

## 4 Herstellung und Test verschiedener Komponenten

Für das Projekt des neuen Injektorkryostaten mussten etliche neue Bauteile hergestellt und getestet werden. So wurde ein Triple Stub Tuner entworfen [33, 34], der es ermöglicht, auch weiterhin die Einkopplergüte zu variieren. Auch wurden erfolgreich neue Piezoaktuatoren im vertikalen Testkryostaten bei 2 K betrieben [35, 36]. Dieses Kapitel fasst die Untersuchungen aller Bauteile zusammen, die im Rahmen dieser Arbeit vor der Montage durchgeführt wurden. Die Herstellung der neuen supraleitenden Strukturen wird im darauf folgenden Kapitel separat vorgestellt.

### 4.1 Test des Stickstoffschilds

Bis auf die Turmsektion gab es an der Konstruktion des Stickstoffschilds gegenüber den aktuell verwendeten Standardmodulen keine Änderung. Im Wesentlichen besteht dieser Schild aus einem großen Zylinder aus 4 mm dickem Aluminium mit einem Außendurchmesser von 418 mm, der an einem Ende über einen Vorratsbehälter in Form eines Hohlzylinders (298 mm Innendurchmesser) für flüssigen Stickstoff verfügt. Durch Schweißstellen thermisch mit dem Zylinder verbundene Aluminiumrohre führen an der Innenseite des Schilds entlang. Sie sind im Betrieb ebenfalls mit flüssigem Stickstoff gefüllt. Abbildung 4.1 zeigt ein Foto des Inneren des Schilds. Dort erkennt man wie die Rohre mit dem Hohlzylinder verbunden sind.

Um die Funktionalität des Stickstoffschilds zu überprüfen, wurde das Kryostatmodul ohne Heliumtank verschlossen und mit Hilfe einer Turbomolekularpumpe ein Isoliervakuum von  $4 \cdot 10^{-3}$  mbar hergestellt. Anschließend wurde der Stickstoffschild über eine Transferleitung mit flüssigem Stickstoff befüllt. Für die Temperaturmessung waren vier Temperatursensoren (Modell DT-670A-CU-HT) an verschiedenen Stellen angebracht, die mit einem Temperatur Monitor Modell 210 der Fa. LakeShore [37] ausgelesen wurden. Die Position der Sensoren war dabei so gewählt, dass sie einen möglichst großen Abstand zum Hohlzylinder und den





Abb. 4.1: Foto vom Inneren des Stickstoffschilds. An der Innenseite des Aluminiumzylinders verlaufen Rohre, die im Betrieb mit flüssigem Stickstoff gefüllt sind. Der thermische Kontakt wird über Schweißstellen gewährleistet. Die Rohre münden in einen Vorratsbehälter in Form eines Hohlzylinders (298 mm Innendurchmesser). Die rechts oben sichtbare Edelstahlleitung wird für das Abkühlen des Moduls benötigt und in diesem Fall von kaltem Heliumgas durchströmt. Sie hat keine Verbindung zum Stickstoffschild.

Stickstoffleitungen hatten. In Abb. 4.2 werden die Ergebnisse des Abkühlens zusammen mit den Sensorpositionen dargestellt. In den ersten Stunden musste fast stündlich flüssiger Stickstoff nachgefüllt werden. Nach 19 Stunden erfolgte die letzte Befüllung. Es zeigte sich, dass die Temperaturen über 25 Stunden stabil blieben. Ein signifikanter Temperaturanstieg konnte erst nach  $t = 76$  h festgestellt werden. Damit war erwiesen, dass der Stickstoffschild, der ca. 40 Liter  $\text{LN}_2$  fasst, eine ausgezeichnete Isolierung gegenüber der Kryostathülle besitzt.

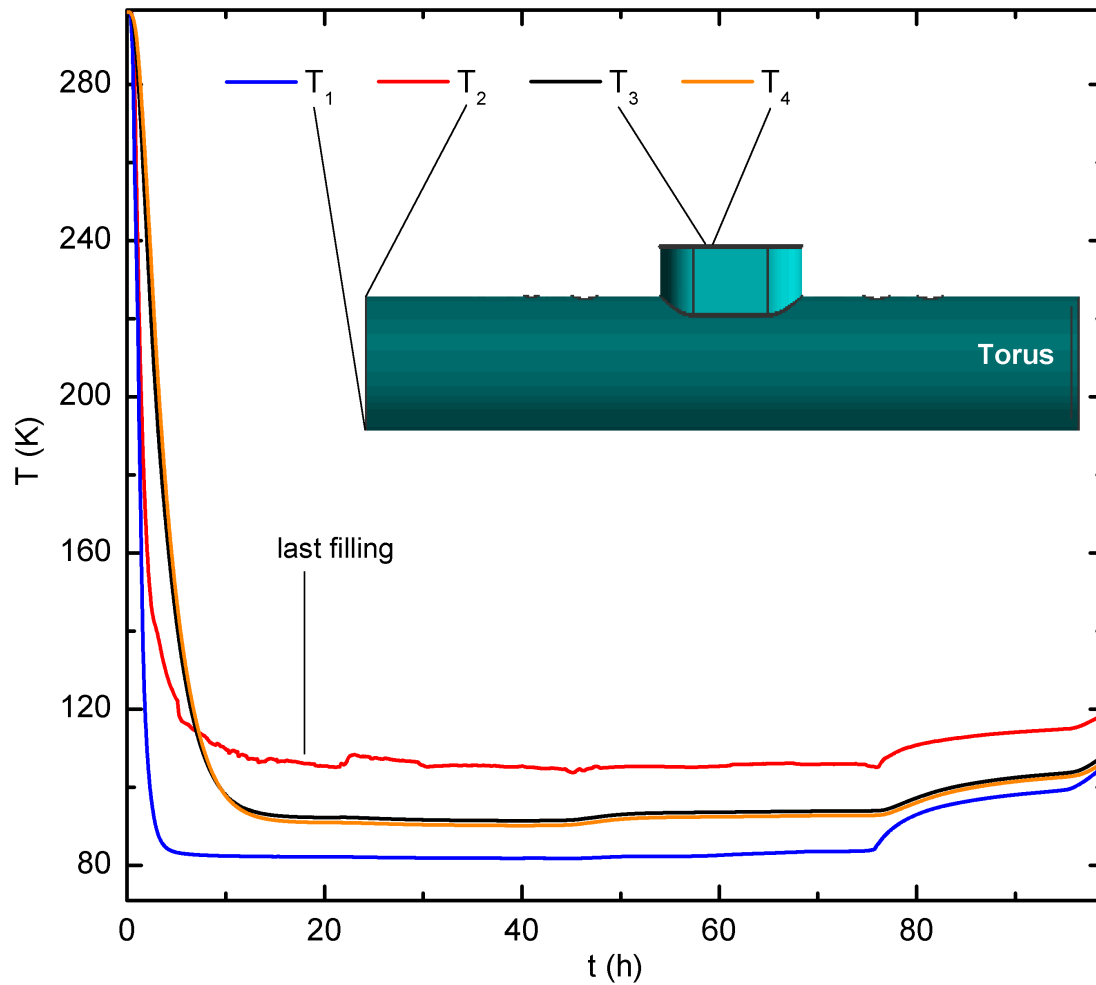


Abb. 4.2: Ergebnisse des ersten Abkühlens des Stickstoffschilds im Modul ohne eingebauten Heliumtank. Die Position der vier Temperatursensoren ist gekennzeichnet. Sensor Nummer 4 war dabei am Ende einer Kupferlitze befestigt, mit deren Hilfe später die Kältebrücke zur Hohlleiterverbindung realisiert wird.

Temperatur  $T_1$  sank bis auf 81 K und selbst die Temperaturen  $T_3$  und  $T_4$  am Turm lagen mit 90 und 91 K noch sehr nah an der Siedetemperatur von Stickstoff. Die zu hohen Temperaturen an Sensor 2 wurden durch schlechten thermischen Kontakt verursacht, den dieser Sensor zum Stickstoffschild hatte. Während des Abkühlens des Heliumtanks, das in Kap. 6 vorgestellt wird, konnte auch an dieser Stelle eine tiefere Temperatur von 83 K gemessen werden.

## 4.2 Magnetische Abschirmung

Die magnetische Abschirmung für die Beschleunigungsstrukturen am S-DALINAC erfolgt durch Schichten 0.1 mm dünnen Cryoperm-Blechs, das direkt um die Kavitäten angebracht ist. Untersuchungen in [38] ergaben, dass diese Abschirmung nur bedingt effektiv ist. Außerdem wurde festgestellt, dass die aktuell verwendeten Module Magnetisierungen des Edelstahls aufweisen, aus dem die Heliumtanks gefertigt sind, und dadurch die magnetische Flußdichte im Heliumtank stellenweise höher ist, als das natürliche Erdmagnetfeld. Messungen im Rahmen von [39] stellten sicher, dass dies beim neuen Kryostatmodul nicht der Fall war. Daraufhin wurde dieser von außen mit 2 mm dickem Cryoperm-Blech verkleidet, um zukünftig eine effektivere Abschirmung des Erdmagnetfelds zu gewährleisten.

### 4.2.1 Einfluss von Magnetfeldern auf die Resonatorgüte

Bei Wechselstrom bleibt der elektrische Restwiderstand supraleitender Materialien auch unterhalb der Sprungtemperatur  $T_c$  endlich. Die BCS-Theorie [40] liefert für  $T < T_c/2$  einen Hochfrequenzwiderstand von

$$R_{BCS} = A \frac{f^2}{T} e^{-\frac{\tau}{T}}. \quad (4.1)$$

Hierbei sind  $A = 8.89 \cdot 10^{-5} \Omega \text{K}/(\text{GHz})^2$  und  $\tau = 1.767 \text{ K}$  experimentell bestimmte Konstanten. Da der BCS-Widerstand quadratisch mit der Frequenz  $f$  skaliert, ist es am S-DALINAC zwingend notwendig die Betriebstemperatur  $T$  auf 2 K abzusenken. Durch diese Maßnahme verbessert sich  $R_{BCS}$  um etwa einen Faktor 50 gegenüber dem Wert bei 4.2 K auf 58 nΩ. Die Resonatorgüte  $Q_0$  ist mit dem Restwiderstand  $R_{res}$  über einen Geometriefaktor  $G$ , der für S-DALINAC-Strukturen 275 Ω beträgt, über

$$Q_0 = \frac{G}{R_{res}} \quad (4.2)$$

verknüpft. Aus diesen Werten ergibt sich für die S-DALINAC-Kavitäten das theoretische Limit von  $Q_0 = 4.75 \cdot 10^9$  für  $R_{res} = R_{BCS}$ . Dieser Maximalwert kann jedoch niemals erreicht werden, da sich parasitäre Widerstände zum Hochfrequenzwiderstand addieren. Hierbei handelt es sich um Einflüsse durch Imperfektionen des Kristallgitters, schlecht präparierte Oberflächen, Einschlüsse von

Fremdatomen oder resorbiertem Wasser aufgrund der Luftfeuchtigkeit. Der gesamte Restwiderstand einer supraleitenden Beschleunigungsstruktur ergibt sich somit durch die Summe

$$R_{res} = R_{BCS} + R_{cont} + R_{mag}. \quad (4.3)$$

Mit modernen Methoden der Oberflächenbehandlung kann man für  $R_{cont}$  Werte von 10 bis 20  $n\Omega$  [40] erreichen. Der magnetische Restwiderstand  $R_{mag}$  kommt dadurch zustande, dass ein beim Abkühlen vorhandenes, äußeres Magnetfeld im Niob eingeforen werden kann [41]. Aufgrund des Meißner-Ochsenfeld-Effektes erwartet man, daß alle Felder, die kleiner als das kritische Feld  $B_{c1}$  sind, aus dem Supraleiter herausgedrängt werden. Jedoch kann an der Oxidschicht auf der Oberfläche sowie an Gitterdefekten und Fremdatomen magnetischer Fluß gefangen werden. Mit Hilfe von

$$R_{mag} = R_n \frac{B_{ext}}{2B_{c2}} \quad (4.4)$$

lässt sich dieser Beitrag zum Restwiderstand berechnen. Hierbei ist  $R_n$  der normalleitende Oberflächenwiderstand bei tiefen Temperaturen infolge des anomalen Skineffekts. Er beträgt in diesem Fall 2.6  $m\Omega$  [38]. Das kritische Magnetfeld  $B_{c2}$  für Niob beträgt ca. 240 mT. Mit diesen Werten vereinfacht sich Gl. (4.4) zu

$$R_{mag} = 5.4 \text{ m}\Omega \cdot B_{ext}[\text{T}] . \quad (4.5)$$

Entscheidend für den Betrag von  $R_{mag}$  ist somit das externe Magnetfeld  $B_{ext}$ , welchem die Beschleunigungsstrukturen beim Abkühlen ausgesetzt sind. Eine Abschirmung äußerer Magnetfelder ist für supraleitende Beschleunigungsstrukturen daher unverzichtbar, da schon das Erdmagnetfeld mit ca. 40  $\mu\text{T}$  einen Beitrag von 216  $n\Omega$  zum Restwiderstand verursacht und somit die Resonatorgüte auf Werte unter  $1 \cdot 10^9$  begrenzt. Um die Designgüte von  $3 \cdot 10^9$  erreichen zu können, muss das externe Magnetfeld auf Werte unterhalb von 4.2  $\mu\text{T}$  reduziert werden, wenn man für  $R_{cont}$  von einem Wert von 10  $n\Omega$  ausgeht.

#### 4.2.2 Messung des Magnetfelds im neuen Heliumtank

Das Magnetfeld im neuen Heliumtank wurde mit Hilfe eines Gaußmeters (Modell 450) und Hall-Sonden vom Typ MMA-1818-VH und MMT-6J18-VH der Fa.

LakeShore vermessen. Die Sonden wurden dazu in dem Aluminiumrahmen der Beschleunigungsstrukturen auf Höhe der Strahlachse fest verschraubt. Im Anschluss wurde die Bank in Schritten von 10 cm in den Heliumtank geschoben. Gemessen wurden die longitudinale Komponente in Strahlrichtung  $B_z$  und die beiden dazu orthogonalen Komponenten (horizontal  $B_x$ , vertikal  $B_y$ ). Die prinzipielle Ungenauigkeit war dabei laut Herstellerangaben  $0.15 \mu\text{T}$ . Dazu kam ein Fehler von  $0.09 \mu\text{T}/^\circ\text{C}$  der durch die Temperaturabhängigkeit der Messsonde gegeben ist. Bei einer maximalen Temperaturschwankung von  $\pm 2^\circ\text{C}$  während der Messungen betrug dieser somit rund  $\pm 0.2 \mu\text{T}$ . Die Untersuchungen fanden im Labor statt, da die Beschleunigerhalle aufgrund des laufenden Strahlbetriebs nicht zur Verfügung stand. Allerdings wurde darauf geachtet, dass das Modul die gleiche Ausrichtung wie die Kryostaten in der Halle hatte. In Abb. 4.3 sind die Ergebnisse zusammengefasst, darunter auch eine Messung des magnetischen Felds im Labor an der selben Stelle, an der das Modul vermessen wurde. Hierbei wurde das Feld in Schritten von 50 cm erfasst und es ergab sich ein mittlerer Wert von  $35 \mu\text{T}$ . Eine Gegenüberstellung der Absolutbeträge aus beiden Messungen, wie im unteren Teil von Abb. 4.3 dargestellt, zeigt, dass das Magnetfeld sehr wirkungsvoll abgeschirmt wird. Der Durchschnittswert für die Beträge des Magnetfelds innerhalb des Moduls betrug  $5.2 \mu\text{T}$ . Der Heliumtank war jedoch für die Messung zum Einschieben der Bank mit den Messsonden an der Strahleintritts- und Strahlaustrittsseite offen und nicht abgeschirmt, wodurch es in diesem Bereich zu einer Feldüberhöhung kam [39], die das Ansteigen der Werte in der Nähe dieser Öffnungen erklärt (erster Messpunkt). Im Inneren fällt das Magnetfeld dann schnell auf einen Durchschnittswert von  $4 \mu\text{T}$  ab, der sich unter Nichtberücksichtigung der Werte für die ersten 30 und letzten 20 cm ergibt. Dies ist durchaus zulässig, da im zusammengebauten Zustand in diesem Bereich keine Kavitäten verbaut sind. Die bislang besten Werte für magnetische Abschirmungen lagen im Bereich von  $10\text{--}15 \mu\text{T}$  [38]. Somit konnte eine entscheidende Verbesserung erreicht und die Forderung aus dem vorangegangenen Unterabschnitt 4.2.1 von  $B_{\text{ext}} < 4.2 \mu\text{T}$  für den Bereich der supraleitenden Kavitäten erfüllt werden, ohne zusätzlich die zur Zeit verwendete lokale Abschirmung eingesetzt zu haben. Somit wird diese beim Betrieb des neuen Kryostatmoduls nicht mehr benötigt.

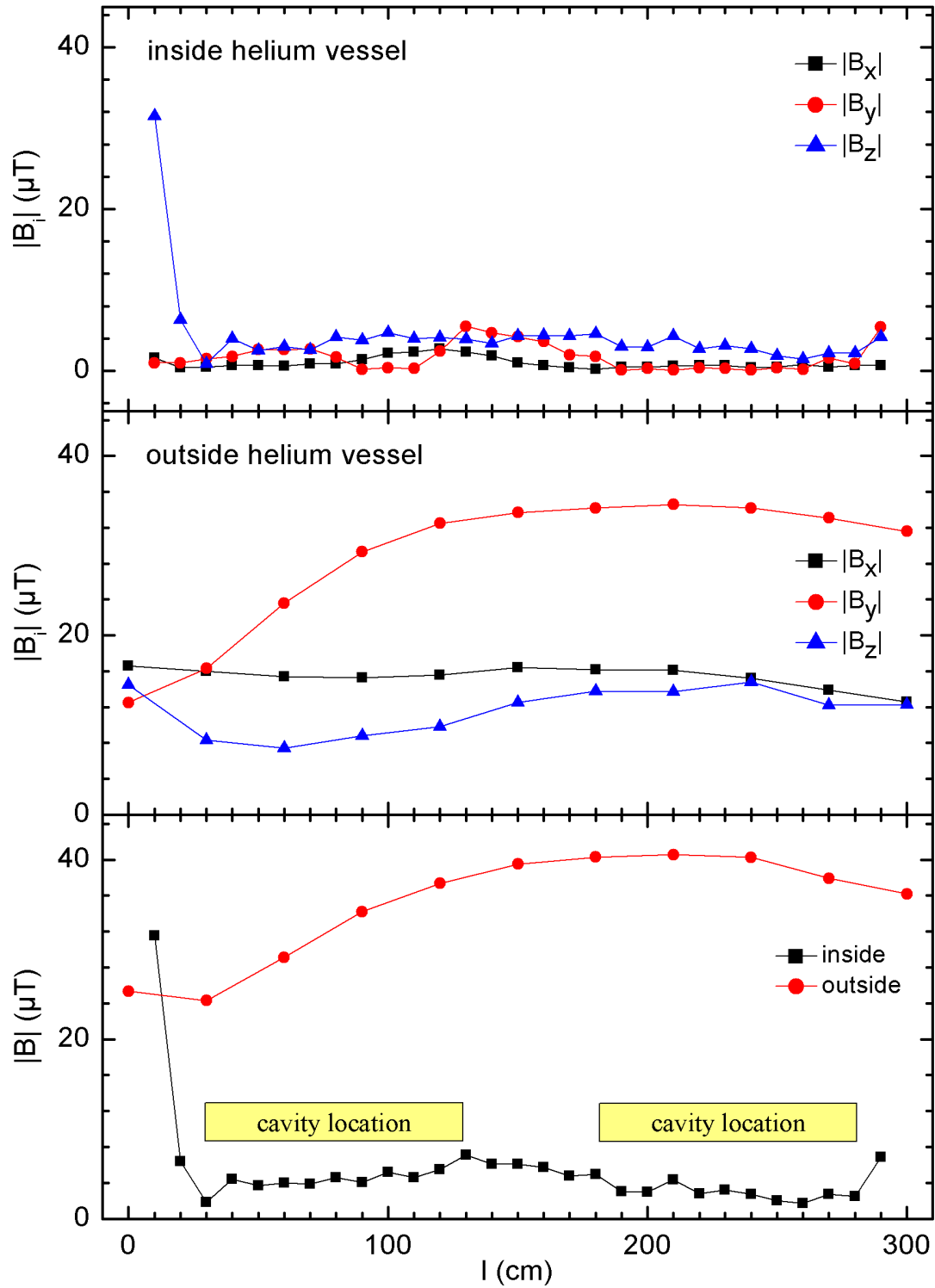


Abb. 4.3: Messungen zur magnetischen Abschirmung. Die ersten beiden Diagramme zeigen die Beträge der Komponenten des Magnetfelds in alle drei Raumrichtungen innerhalb und außerhalb des Moduls. Im unteren Bild werden die Absolutbeträge der magnetischen Flußdichte innerhalb und außerhalb des Moduls gegenübergestellt.

## 4.3 Hohlleiterkomponenten

Für die in Kap. 3.3 vorgestellte Hohlleiterdurchführung mussten verschiedene Bauteile im Haus gefertigt bzw. geliefert werden. Die geraden Hohlleiterverbindungen wurden in der Feinmechanikwerkstatt des Instituts für Kernphysik aus Edelstahl hergestellt. In den folgenden Unterabschnitten wird die Beschaffung spezieller WR-284-Bauteile wie Hohlleiterbälge, Vakuumfenster und Blendenelemente erläutert, und es werden Messungen präsentiert, die notwendig waren um ihre Tauglichkeit zu überprüfen.

### 4.3.1 Flexible Elemente

Flexible Hohlleiter werden als Standardkomponenten von Herstellern für HF-Verbindungen vertrieben. Allerdings sind diese meistens nur für Anwendungen bei Raumtemperatur und Normaldruck vorgesehen. Die Bauteile sind in der Regel aus Messing gefertigt und nicht hochvakuumgeeignet. Außerdem haben Kupfer, Messing und Bronze einen hohen Wärmeleitwert und sind somit nicht für Tieftemperaturanwendungen brauchbar. Bei den derzeitigen Einkopplern des S-DALINAC wird ein innen verkupfelter Wellbalg aus Edelstahl als flexibles Element in der coaxialen Leitung verwendet. Die im neuen Kryostatmodul eingesetzten rechteckigen Balgeinheiten wurden nach ihrer Herstellung durch die Fa. Witzenmann am Institut für Kernphysik mehrfachen thermischen Zyklen unterzogen und jeweils auf ihre Dichtigkeit überprüft. Mechanisch sind die Bauteile vergleichsweise steif. Jedoch bieten zwei solcher Einheiten pro Transferleitung genügend Flexibilität für die Verwendung im Kryostaten.

Die Galvanisierung der Bälge, wie auch der oben erwähnten starren Bauteile, übernahm eine Werkstatt der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI). Die Dicke der Kupferschicht beträgt ca.  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Zwar hätte eine dünnere Schicht zu geringerem statischen Wärmeeinfall geführt, jedoch musste garantiert werden, dass an keiner Stelle weniger als die dreifache Skintiefe von  $\delta = 1.2\text{ }\mu\text{m}$  aufgetragen wurde. Nur so ist sichergestellt, dass die dynamischen Verluste nicht größer ausfallen als in Abschn. 3.5 abgeschätzt.

Nach der endgültigen Fertigstellung und erfolgreichen Dichtigkeitstests nach nochmaliger Anwendung von thermischen Zyklen wurde mit Hilfe eines Netzwerk-

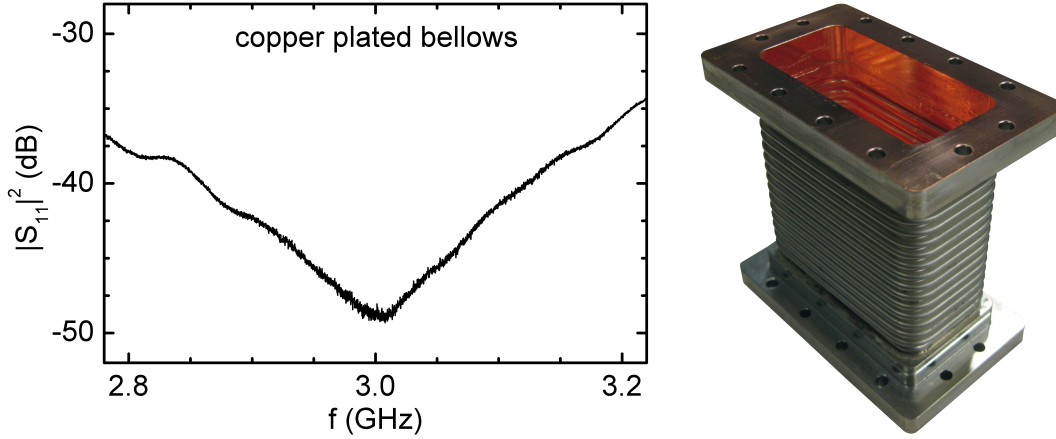


Abb. 4.4: Kalibrierte Reflexionsmessung an einem der neuen Hohlleiterbälge, rechts ein Foto des 101 mm langen Bauteils.

analysators das Bauteil hinsichtlich seiner HF-Eigenschaften vermessen. Dafür wurde mit Hilfe des Programms GWignerfit [42] eine TRL-Kalibration [43, 44] durchgeführt, um die Einflüsse von Kabeln und Adapterstücken zu eliminieren. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.4 dargestellt. Mit Werten unterhalb  $-30$  dB im gesamten Frequenzbereich und  $-45$  dB Reflexion im Bereich der Betriebsfrequenz erfüllt der Balg alle Voraussetzungen für den Einsatz als Bestandteil der Hohlleiterdurchführung. Insgesamt wurden acht der hier gezeigten Hohlleiterbälge produziert, so dass in Zukunft vier Stück als Reserve zur Verfügung stehen.

### 4.3.2 Vakuumfenster

Die Hohlleiterdruckfenster für den Übergang von Vakuum zu Normaldruck wurden von der Fa. Mega Industries bezogen. Der Hersteller garantiert die nötige Dichtigkeit für UHV-Anwendungen und ein Stehwellenverhältnis (SWR) zwischen 1.05 und 1.1. Abbildung 4.5 zeigt das Ergebnis einer kalibrierten Messung für eines der Fenster. Das Stehwellenverhältnis errechnet sich dabei aus vorlaufender Leistung  $P_v$  und rücklaufender Leistung  $P_r$  über den folgenden Zusammenhang:

$$\text{SWR} = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_v}}}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_v}}} \quad (4.6)$$

Mit einem SWR-Wert von 1.07 bei der Betriebsfrequenz von 2.997 GHz lag das hier gemessene Vakuumfenster innerhalb des Toleranzbereichs. Insgesamt wurden



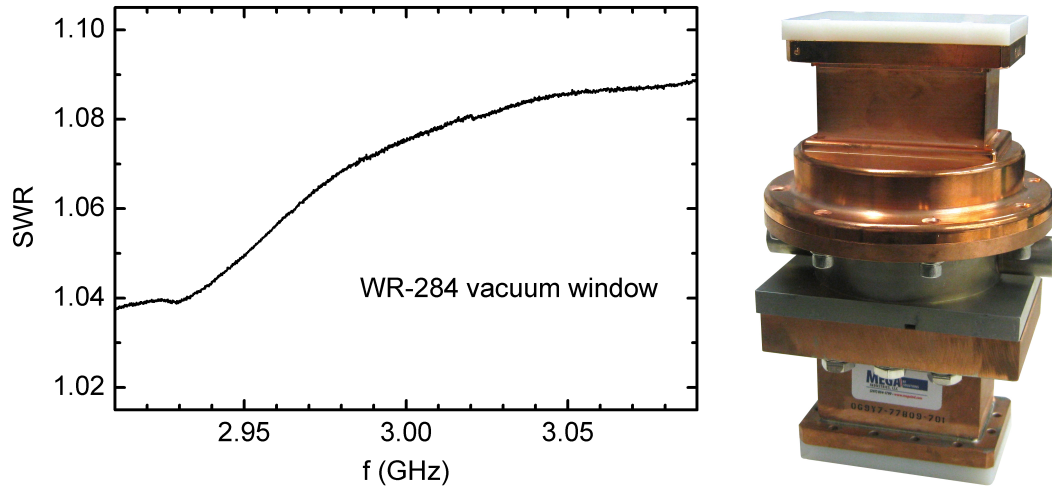


Abb. 4.5: Stehwellenverhältnis aus einer kalibrierten Reflexionsmessung am Vakuumfenster. Für die Betriebsfrequenz von 2.997 GHz liegt das Stehwellenverhältnis bei 1.07. Rechts ein Foto des Bauteils (mit einer Länge von 20 cm).

vier Fenster geliefert, so dass zwei als Ersatz zur Verfügung stehen.

### 4.3.3 Blendenelement

Um Verluste durch Wärmestrahlung zu vermeiden, die innerhalb eines Hohlleiters von dessen warmem Ende zum Heliumbad propagiert, gibt es in der Regel zwei Strategien. Die Verwendung eines kalten Fensters bei 80 K oder gebogene und gekühlte Hohlleiter, um die Infrarotstrahlung zu absorbieren bzw. zu reflektieren. Letzteres kam aufgrund von Platzmangel beim aktuellen Entwurf nicht in Frage, während bei kalten Fenstern die Gefahr eines Bruchs nur schwer abzuschätzen ist. Um trotzdem den Wärmeeintrag über Strahlung zu reduzieren, wurde ein spezieller Hohlleiter hergestellt und getestet. Er verfügt über Stege, die auf die Temperatur des Stickstoffschilds gekühlt ein Hindernis für die Strahlung, jedoch nicht für die Hochfrequenz darstellen. Die Skizze eines solchen Bauteils ist in Abb. 4.6 zu sehen.

Mit Hilfe der Simulationssoftware Microwave Studio [45] konnte gezeigt werden, dass ein Hohlleitersegment mit zwei Stegen, die versetzt jeweils über die Hälfte der Hohlleiterbreite von  $b = 34$  mm in diesen hineinragen, einem Bandpassfilter entspricht. In ersten Rechnungen hatten diese Stege eine Breite  $w$  von 17 mm,

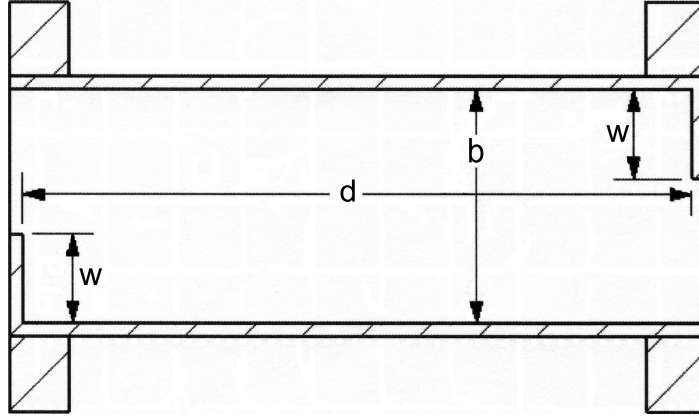


Abb. 4.6: Skizze eines Hohlleiters mit Stegen zum Abfangen von Wärmestrahlung. Die Hohlleiterbreite  $b$  beträgt 34 mm. Die gezeigten Längen  $d$  und  $w$  wurden für verschiedene Simulationen variiert.

um den kompletten Hohlleiterquerschnitt abzudecken. Mit Hilfe der Simulationen wurde dann der optimale Abstand  $d$  für zwei 2 mm dicke Stege bei der Betriebsfrequenz von 2.997 GHz zu 93.5 mm ermittelt. Eine Variation des optimalen Abstandes ergab, dass sich dieser Wert empfindlich auf die Frequenz des Reflexionsminimums auswirkt. Die Verschiebung beträgt ungefähr 4.8 MHz bei einem um 0.3 mm geänderten Abstand. Diese Varianz wurde wegen nicht bekannter Fertigungsgenauigkeiten und aufgrund der Tatsache, dass sich durch thermische Kontraktion die Bauteillänge um bis zu 0.3 mm ändert, gewählt. Da der Frequenzbereich, in dem die Reflexion kleiner als  $-30$  dB ist, nur knapp 20 MHz breit ist und diese Werte noch durch keine Messung bestätigt waren, wurden Simulationen mit verkürzten Stegen durchgeführt. In Abb. 4.7 sind die Ergebnisse für Blendenbreiten von 17 und 13 mm dargestellt. Für die kürzeren Stege ergab sich der optimale Abstand  $d$  zu 97.1 mm. Dabei verbreiterte sich der Frequenzbereich mit Reflexionswerten unter  $-30$  dB auf 37.2 MHz.

Nach diesen Vorüberlegungen wurde aufgrund seiner größeren Akzeptanz der Hohlleiter mit den schmaleren Blenden gebaut. Durch eine kalibrierte Messung konnte das Minimum der Reflexion, wie in Abb. 4.8 gezeigt, bei 3.001 GHz gefunden werden; die Bandbreite, in der die Reflexionswerte unter  $-30$  dB liegen, beträgt 32 MHz. Da für die Betriebsfrequenz die Reflexion nur  $-40$  dB beträgt, ist bereits dieser Prototyp mit seinen Abmessungen für den Einsatz am S-DALINAC geeignet. Der durch die um 25% verkleinerte Querschnittsfläche zu erwartende hö-

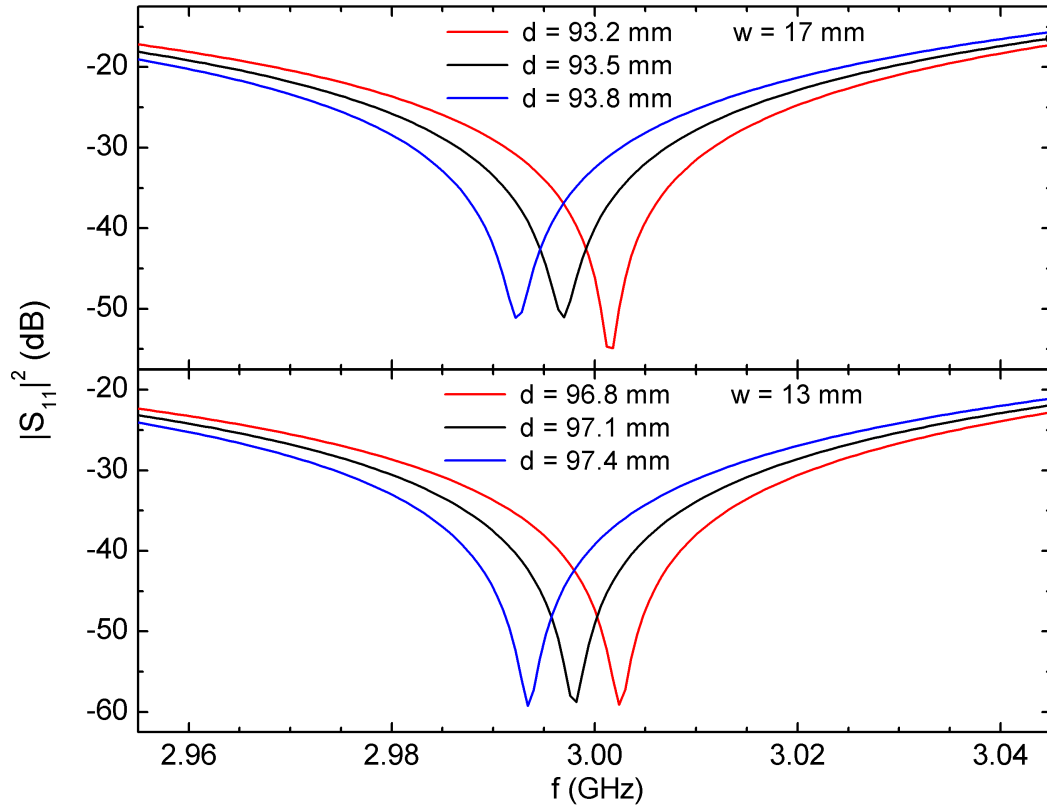


Abb. 4.7: Ergebnisse von Simulationen mit Microwave Studio für ein Blendenelement. Im oberen Bild beträgt die Stegbreite 17 mm, im unteren 13 mm. Für beide Fälle wurde der Abstand  $d$  ermittelt, für den das Minimum der Reflexion bei 2.997 GHz lag (schwarze Kurve). Die rote und blaue Kurven zeigen die Ergebnisse, wenn  $d$  um 0.3 mm variiert wird.

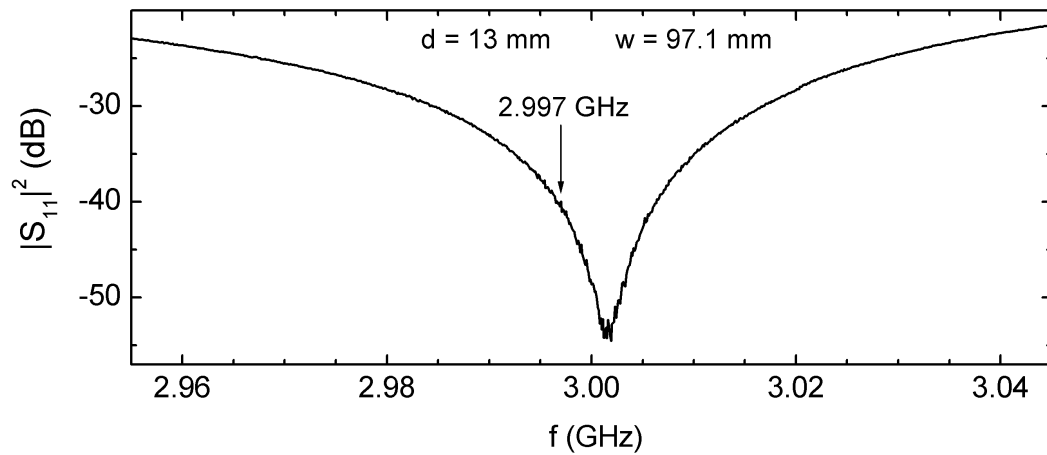


Abb. 4.8: Reflexionspektrum des Hohlleiterbauteils mit 13 mm breiten Stegen im Abstand von 97.1 mm.

here Wärmeeintrag wurde bereits bei den in Abschn. 3.5 gemachten Abschätzungen zu den thermischen Verlusten berücksichtigt. Mit den Erfahrungswerten aus der nun vorliegenden Messung und den Simulationen ist es möglich, die nächste Baureihe solcher Blendenelemente in Hinblick auf ihre Effizienz weiter zu optimieren.

Durch die erfolgreiche Entwicklung der flexiblen Hohlleiter und Blendenelemente, sowie die Beschaffung eines UHV-tauglichen Vakuumfensters, erfüllt das in Kap. 3 vorgestellte, neu konstruierte Kryostatmodul die in Abschn. 2.4 aufgestellten Anforderungen. Die hohe Qualität der magnetischen Abschirmung war ebenso wie die Möglichkeit die Montage unter Reinraumbedingungen durchführen zu können, Grundvoraussetzung die Beschleunigungsstrukturen mit möglichst hohen Güten zu betreiben. Um die hohen Beschleunigungsfelder von 7 MV/m pro Kavität zu erreichen wurden zusätzlich neue 20-zellige Niobkavitäten gefertigt, deren Herstellung im nächsten Kapitel detailliert beschrieben wird.

## 5 Herstellung neuer Beschleunigungsstrukturen

Zu Beginn dieser Arbeit verfügte der S-DALINAC über 12 zwanzigzellige Kavitäten. Davon waren 10 im Betrieb und zwei im Reinraum gelagert. Damit unter Beibehaltung dieser Reserve das derzeitige Injektormodul, nachdem es durch das neue Kryostatmodul ersetzt sein wird, als komplett bestückte Ersatzeinheit für den Hauptbeschleuniger bereit gehalten werden kann, wurden im Rahmen dieser Arbeit für das neue Modul auch drei Beschleunigungsstrukturen hergestellt. Durch Einsatz eines Fertigungsverfahrens, dass dem neuesten Stand der Technik beim Kavitätenbau entspricht, sowie durch weiterentwickelte Präparations- und Montagemöglichkeiten und die in Abschn. 4.2 beschriebene, deutlich verbesserte Abschirmung externer Magnetfelder, werden für die Beschleunigungsstrukturen signifikant bessere Werte für Beschleunigungsfeld und unbelastete Güte erwartet, so dass der Injektor Strahlenergien bis 14 MeV liefern kann. Das hier verwendete Fertigungsverfahren, das im Folgenden beschrieben wird, unterscheidet sich ganz wesentlich von der Methode, nach der 1990–92 die derzeitigen Kavitäten [46] produziert wurden. Deshalb werden, wo erforderlich, Quervergleiche vorgenommen.

Früher wurden aus zwei Halbzellen zunächst einzelne Zellen produziert und nach diversen Messungen und Behandlungen zu einer Beschleunigungsstruktur verschweißt. Heutzutage ist es jedoch üblich, zwei Halbzellen zuerst zu einer Hantel (Abb. 5.1) zusammenzuschweißen, bevor man aus diesen dann die Kavität fertigt. An den Irisblenden ist im Betrieb die Oberflächenfeldstärke des elektrischen Felds maximal und somit ist dieser Bereich besonders durch Feldemission gefährdet [47]. Da die Schweißnähte an den Irisblenden bei einer Hantel besser kontrollierbar sind und gegebenenfalls nachbearbeitet werden können, um glatte Oberflächen in diesem Bereich zu gewährleisten, liegt der Vorteil des Verfahrens auf der Hand. Die abschließenden Schweißarbeiten, bei denen die Hanteln an den Äquatoren verbunden werden, sind weniger kritisch, da dort kein elektrisches Feld anliegt. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung solcher Bauteile für die fertige Kavität besteht darin, dass die Resonanzfrequenz der  $\pi$ -Mode einer von zwei elektrisch leitenden Oberflächen abgeschlossenen Hantel der Frequenz der  $\pi$ -Mode einer vielzelligen Kavität entspricht [48]. Auf diese Weise lässt sich während der Produktion die Zielfrequenz besser kontrollieren. Bei der Produktion in



Abb. 5.1: Foto einer Hantel, die zur Herstellung der neuen 20-zelligen Beschleunigungsstrukturen für den S-DALINAC verwendet wurde. An der Irisblende betrug der Innendurchmesser 34.45 mm.

den 90er Jahren musste man sich dagegen auf die Ergebnisse von Simulationen stützen und viele Erfahrungswerte sammeln, da die Frequenz einer einzelnen Zelle zunächst keinen einfachen Zusammenhang mit der  $\pi$ -Mode der fertigen Kavität hat.

Die Halbzellen wurden im Tiefziehverfahren [40] aus 2 mm starken Nioblechen hergestellt. Zuvor wurden diese Bleche mit einem Wirbelstromverfahren [49] auf mögliche Verunreinigungen untersucht, da selbst in mehrfach geschmolzenem, hochreinem Niob gelegentlich Spuren von Tantal vorhanden sind. Für die Produktion der drei neuen Kavitäten wurden daher nur Niobleche verwendet, bei denen diese Tests negativ ausfielen. Bleche, bei denen der Verdacht einer Verunreinigung bestand, wurden lediglich für Hanteln zu Testzwecken verwendet. Nach dem Tiefziehen wurde das überstehende Niob so abgedreht, dass Halbzellen entstanden, aus denen mittels Elektronenstrahlverschweißung Hanteln produziert werden konnten. Im nächsten Schritt wurden diese nochmals abgedreht, bevor sie zu einer Kavität verschweißt wurden. Als letzte Maßnahme, die vom Hersteller, der Fa. RI Research Instruments GmbH, durchgeführt wurde, erfolgte eine chemische Behandlung (BCP) der gesamten Kavität, um im Inneren einwandfreie HF-Oberflächen sicherzustellen.

In den folgenden Abschnitten werden die Details der Fertigung vorgestellt. Dazu wird zunächst erklärt, welche Erfahrungswerte aus der früheren Produktion

von S-DALINAC-Beschleunigungsstrukturen auch für die Fertigung der neuen Kavitäten genutzt werden konnten, bevor erläutert wird, wie die noch fehlenden Informationen gewonnen wurden.

## 5.1 Möglichkeiten zur Frequenzabstimmung

Neben dem Erreichen hoher Güten ist das Ziel bei der Herstellung supraleitender Kavitäten, dass die fertige Struktur die korrekte Länge bei der gewünschten Frequenz der Betriebsmode hat, da dies Voraussetzung für eine optimale Beschleunigung ist. Wie in Abschn. 2.2 erklärt, müssen die 20 Zellen einer S-DALINAC-Kavität insgesamt eine Länge von einem Meter aufweisen, um Elektronen mit  $\beta=1$  ohne Phasenschlupf zu beschleunigen. Deshalb sollte die Länge einer fertigen Struktur wie bei der früheren Produktion, um maximal 2 Millimeter vom Sollwert (1 m) abweichen. Daher musste überprüft werden, welche Möglichkeiten es gibt Länge und Resonanzfrequenz möglichst unabhängig voneinander zu beeinflussen.

### 5.1.1 Physikalisches Prinzip

Magnetische und elektrische Feldenergie in einem Resonator, der mit seiner Eigenfrequenz schwingt, sind immer gleich groß. Auf eine Änderung einer der Feldenergien antwortet das System mit einer Verschiebung der Resonanzfrequenz, so dass beide wieder gleich groß sind. Dieses physikalische Prinzip wird durch das Theorem von J. C. Slater [50] beschrieben. Es lautet:

$$\omega^2 = \omega_0^2 \left( 1 + \int_V (H_a^2 - E_a^2) dV \right) \quad (5.1)$$

Es beschreibt, wie sich bei einer Volumenänderung an einem elektromagnetischen Resonator die Resonanzfrequenz  $\omega$  gegen den ungestörten Wert  $\omega_0$  verschiebt. Die Größen  $E_a^2$  und  $H_a^2$  sind hierbei proportional zu den Quadraten der magnetischen und elektrischen Feldstärke im ungestörten Resonator und so normiert, dass das Integral über das Resonatorvolumen 1 ergibt. Die Volumenänderung  $dV$  ist dabei so definiert, dass ihr Vorzeichen bei einer Volumenverkleinerung positiv ist.

### 5.1.2 Anwendung auf Beschleunigungsstrukturen

Fertige Kavitäten kann man im Ganzen oder Zelle für Zelle strecken oder stauchen. Dies ändert ihre Länge, aber auch ihre Resonanzfrequenzen, obwohl das eigentliche Volumen weitgehend unverändert bleibt. Beim Strecken zum Beispiel vergrößert man das Volumen im Irisbereich, also dort, wo die elektrische Feldstärke ihre größten Werte annimmt. Nach Gl. (5.1) ist dies eine negative Volumenänderung im Sinne der Definition und bedeutet somit aufgrund des negativen Vorzeichens von  $E_a^2$  eine Frequenzerhöhung. Gleichzeitig wird durch das Ziehen der Äquatorradius verkleinert. In diesem Bereich dominiert die magnetische Feldstärke, und eine positive Volumenänderung an dieser Stelle erklärt ebenfalls eine Erhöhung der Frequenz. Umgekehrt hat das Stauchen einer Kavität demnach eine niedrigere Resonanzfrequenz zur Folge.

Es gibt weiterhin zwei Möglichkeiten, die Resonanzfrequenzen auch ohne Längenänderung zu beeinflussen. Durch Eindrücken der Zellen am Äquator wird, wie beschrieben, die Frequenz erhöht. Dagegen hat der Materialabtrag bei einer chemischen Behandlung der inneren Oberfläche einen generellen Volumenzuwachs zur Folge, der zu niedrigeren Resonanzfrequenzen führt. Beide Methoden sind jedoch im Gegensatz zu den ersten Verfahren irreversibel und müssen daher mit Bedacht angewandt werden. In Tab. 5.1 sind alle Erfahrungswerte zur Frequenzänderung an 20-zelligen S-DALINAC-Kavitäten zusammengestellt, die

Tab. 5.1: Erfahrungswerte zur Frequenzänderung an S-DALINAC-Kavitäten.

Für das Eindrücken am Äquator gibt es keine festen Zahlenwerte. Drückt man alle Zellen nur um wenige  $\mu\text{m}$  am Äquator ein, kann man damit die Resonanzfrequenz um einige MHz erhöhen. In der Praxis werden bei allen Methoden die Änderungen an einen Netzwerkanalysator direkt verfolgt.

Stauchen	−500 kHz/mm
Strecken	+500 kHz/mm
Chemischer Abtrag	−25 kHz/ $\mu\text{m}$
Eindrücken am Äquator	+ einige MHz



bereits vor der Produktion der neuen Serie bekannt waren. Für die Bearbeitung von Hanteln mussten dagegen neue Erfahrungswerte gewonnen werden, da kein anderes Beschleunigerlabor mit supraleitenden Strukturen bei 3 GHz arbeitet.

## 5.2 Halbzellengeometrie und Zielfrequenzen

Die Zielfrequenz für die  $\pi$ -Mode einer Hantel wurde auf 2.996 GHz festgelegt. Dieser Wert resultierte aus der Erfahrung, dass die Frequenz der  $\pi$ -Mode einer S-DALINAC Kavität im belüfteten Zustand bei 300 K 2.992 GHz betragen muss, damit sie für die evakuierte Kavität bei 2 K im Bereich zwischen 2.997 und 2.9975 GHz liegt. Bei der neuen Produktionsreihe sollte nach dem Verschweißen der Hanteln zur 20-zelligen Kavität von der inneren Oberfläche durch chemisches Polieren (BCP) eine Schichtdicke von mindestens 160  $\mu\text{m}$  abgetragen werden. Hierdurch wurde sichergestellt, dass neben eventuellen Schweißrückständen auf der Oberfläche auch der durch das Tiefziehen der Halbzellen verursachte so genannte „damage layer“ entfernt wurde. Mit einem Wert für die Frequenzänderung durch BCP von  $-25 \text{ kHz}/\mu\text{m}$  (s. Tab. 5.1) folgte hieraus für den 20-Zeller (und damit auch für die einzelne Hantel) eine Zielfrequenz von 2.996 GHz. Sie lag damit um 2.5 MHz höher als bei der früheren Produktion, bei der durch BCP lediglich 60–80  $\mu\text{m}$  abgetragen wurden. Daraus folgte, dass alle inneren Maße der Mittel- und Endzellen um 0.1 mm reduziert werden mussten, um dem erhöhten Materialabtrag gerecht zu werden. Die mechanischen Zeichnungen der Halbzellen für die neue und die frühere Produktionsreihe sind im Anhang B zusammengestellt.

Um die Zielfrequenz zu bestätigen, wurden Simulationen für eine Hantel mit Microwave Studio durchgeführt. Zur experimentellen Absicherung der Simulation wurde eine Hantel mit der neuen Geometrie aus einem Kupferblock gefertigt und anschließend mit zwei Kupferplatten zu einem Hohlraumresonator verpresst. Mit Hilfe zweier kleiner Antennen war es möglich die Resonanzfrequenzen in Transmission zu messen. Die Ergebnisse sind in Tab. 5.2 zusammengefasst. Neben den Hanteln, die aus zwei Mittelhalbzellen bestehen, gab es in der Produktion noch Hanteln, die aus einer Mittelhalbzelle und einer Endhalbzelle bestanden. Eine solche „Mischhantel“ wird mit der kleineren Halbschale später an die sogenannte

Tab. 5.2: Daten zur Ermittlung der Zielfrequenzen für die einzelnen Baugruppen. Die Zielfrequenz für die fertig geschweißte Kavität vor der chemischen Behandlung ist die gleiche wie die einer Hantel.

	Hantel	Mischhantel	Endgruppe
	$\pi$ -Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	0-Mode (GHz)
Messung (Kupfernachbildung)	2.99523	-	-
Simulation mit CST	2.99681	3.01399	2.96765
Extrapolation (Chemie-Daten)	2.99600	-	-
Zielfrequenz für Fertigung	2.996	3.014	2.968

Endgruppe geschweißt, die aus dem cut-off-Rohr mit einer Endhalbzelle besteht. Für diese beiden Baugruppen wurden die Zielfrequenzen mit Microwave Studio ermittelt, da hierfür keine Erfahrungswerte vorlagen. Die Ergebnisse der Simulationen sind ebenfalls in Tab. 5.2 verzeichnet. Aufgrund ihrer Geometrie besitzt die Endgruppe nur eine Mode, die im weiteren 0-Mode genannt wird.

### 5.3 Planung der Produktion

Um bei der tatsächlichen Produktion der Kavitäten die gewünschten Ergebnisse zu erzielen, mussten die Resultate der Simulationen mit den Ergebnissen begleitender Messungen verglichen werden. Die Zahl der zur Verfügung stehenden Niobbleche war jedoch sehr knapp bemessen, so dass mit der Herstellerfirma vereinbart wurde, zunächst zwei Hanteln zu Testzwecken zu fertigen, um die Werte aus der Theorie und den Abschätzungen durch Messungen zu überprüfen. Danach sollten alle Bauteile für die drei Kavitäten produziert und daraus zunächst eine Kavität gefertigt werden. Auf diese Weise konnten die Erkenntnisse aus deren Herstellung für die der zwei weiteren herangezogen werden. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da insbesondere Längen- und Frequenzänderungen durch das Elektronenstrahlschweißen zu Beginn der Produktion nicht bekannt waren. Eben-

so musste der Gradient der Frequenzänderung durch die chemische Behandlung nochmals überprüft werden.

## 5.4 Frequenzmessungen an Hanteln

Nach der Fertigung hatten die Hanteln zunächst ein Übermaß. In der fertigen Kavität soll jedoch jede Hantel eine Länge von 50 mm besitzen, damit sich daraus eine 1 m lange 20-zellige Kavität ergibt. Es galt nun herauszufinden, wie sich die Resonanzfrequenzen der einzelnen Baugruppen beim Abdrehen dieses Übermaßes verhalten, um dies im weiteren Fertigungsprozess zu berücksichtigen. Aus Gl. (5.1) geht hervor, dass ein Abdrehen zu einer Erhöhung der Resonanzfrequenzen führen muss, da sich das Volumen des Resonators dadurch verkleinert. Das Stauchen oder Strecken einer Hantel bewirkt äquivalent zur kompletten Kavität eine Verkleinerung bzw. Vergrößerung der Resonanzfrequenzen. Dies bedeutet, dass beispielsweise eine Hantel, die noch eine gewisse Überlänge hat, sich jedoch schon bei der richtigen Resonanzfrequenz befindet, um einen gewissen Anteil abgedreht werden muss, wodurch sich eine Frequenz größer als die Zielfrequenz ergibt. Die restliche Längendifferenz würde dann durch Stauchen ausgeglichen, um die Resonanz wieder zurück zur Zielfrequenz zu bringen. Das Strecken oder Stauchen wurde jedoch erst an der geschweißten Kavität durchgeführt, da hierfür Erfahrungswerte (s. Tab. 5.1) vorlagen. Um die Frequenzänderungen, die sich beim Abdrehen der Hanteln und Endgruppen ergeben, zuverlässig bestimmen zu können, musste zunächst ein Messaufbau realisiert werden, der im Folgenden kurz erläutert wird.

### 5.4.1 Messstand

Für die Messung der Resonanzfrequenzen der Hanteln wurde ein Messstand konstruiert, in dem die Hantel zwischen zwei Kupferscheiben eingespannt war. Abbildung 5.2 zeigt ein Foto des Aufbaus. Die Kupferscheiben hatten im mittleren Bereich eine Dicke von 5 mm und besaßen hier einen Antennenport, über den ein HF-Kabel angeschlossen werden konnte. Im Randbereich waren die Scheiben



Abb. 5.2: Foto des Aufbaus für HF-Messungen an den Hanteln.

mit 0.3 mm schmalen Schlitten versehen und ihre Dicke war hier auf 1 mm reduziert. Angedrückt wurden sie von außen durch einen steifen Metall- und einen Gummiring, so dass die Lamellen gleichmäßig an die Hantel gedrückt wurden. Auf diese Weise erhielt man auch bei kleinen Unebenheiten an allen Stellen der Hantel einen guten elektrischen Kontakt. In Äquatornähe waren als Gegenlager ebenfalls steife, entsprechend geformte Ringe angebracht. So konnte auf die Kupferscheibe der erforderliche Druck ausgeübt werden, ohne die Hantel zu verformen. Der Anpressdruck war so gewählt, dass eine weitere Kraftanwendung keine nennenswerte Güteverbesserung mehr zur Folge hatte, und wurde mit Hilfe handelsüblicher Klammern erzeugt. Ab einer Güte von  $Q \geq 3000$  wurde die Messung begonnen. Lag der Wert darunter, waren meistens Grate am Äquator dafür verantwortlich. Durch Entfernen dieser Unebenheiten und Säuberung der Hantel mit Aceton konnte im Allgemeinen die geforderte Güte erreicht werden. Die gemessenen Resonanzfrequenzen wiesen eine Unsicherheit von  $\pm 50$  kHz auf, die sich durch ungenaue Positionierung der Hanteln im Messstand erklären ließ.

Um die Verteilung der elektrischen Feldstärke innerhalb einer Hantel zu bestimmen wurde jede Messplatte mit einem kleinen Loch, jeweils 12 mm von der Mitte entfernt, versehen, durch das ein dielektrischer Störkörper eingebracht werden konnte. Dies hatte eine Verschiebung der Resonanzfrequenz zur Folge, die sich ebenfalls mit dem in Abschnitt 5.1 genannten Slater-Theorem erklären lässt. Die Änderung der elektrischen Feldenergie durch ein reines Dielektrikum vereinfacht

Gl. (5.1) zu

$$\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} = - \int_V E_a^2 dV. \quad (5.2)$$

Dabei wurde folgende Näherung verwendet:

$$\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2} = \frac{(\omega - \omega_0)(\omega + \omega_0)}{\omega_0^2} = \frac{\Delta\omega(2\omega_0 + \Delta\omega)}{\omega_0^2} \approx \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \quad (5.3)$$

Der Störkörper verursachte also eine Verschiebung der Resonanzfrequenz zu kleineren Werten und diese Änderung  $\Delta\omega$  ist proportional zum Quadrat der elektrischen Feldstärke am Ort des Störkörpers:

$$\Delta\omega \sim E^2 \quad (5.4)$$

Somit erhielt man die Möglichkeit, die relativen Feldstärken in beiden Hantelhälften zueinander zu bestimmen. Im Idealfall sollte diese Feldverteilung für die Hanteln mit zwei Mittelzellenhalbschalen symmetrisch sein. Für die Mischhanteln ist diese Verteilung jedoch unsymmetrisch und muss in der Produktion auch so erreicht werden. Dafür wurde mit Microwave Studio die Feldverteilung einer idealen Mischhantel bestimmt. An der Position des Störkörpers sollte das Verhältnis der Beträge der Feldstärken für die  $\pi$ -Mode nach der Simulation 0.77 betragen.

### 5.4.2 Testhanteln

Aus den Niobblechen, die nicht für die Serienproduktion verwendet werden sollten, wurden zwei Testhanteln hergestellt. Eine aus zwei Mittelhalbzellen und eine aus einer Mittel- und einer Endhalbzelle. Ziel war es, durch stufenweises Abdrehen des Übermaßes mit anschließender Messung der Resonanzfrequenzen den Frequenzgradienten für diesen Arbeitsgang zu finden, um damit die nächsten Arbeitsschritte durchführen zu können.

Die Mittelzellenhantel war zu Beginn der Testreihe fast 55 mm lang, wobei das Übermaß nicht gleichmäßig auf die beiden Halbzellen verteilt war. Auch die Feldverteilung über die Störkörpermessung war mit einem Verhältnis der elektrischen Feldstärken von ca. 0.7 dementsprechend unsymmetrisch, wobei für die  $\pi$ -Mode das größere Feld in der kürzeren Halbzelle herrschte. Zu Beginn wurde daher nur auf der längeren Seite abgedreht. Nach dem vierten Abdrehschritt konnte eine nahezu symmetrische Feldverteilung erzielt werden. Danach wurde wechselseitig

abgedreht, wobei das Verhältnis der elektrischen Feldstärken zwischen 0.88 und 1 schwankte. In Abb. 5.3 sind die Ergebnisse dieser Messreihe aufgetragen. Eine lineare Anpassung ergab eine Geradensteigung von  $-11.49 \text{ MHz/mm}$ . Am Ende besaß die Hantel mit  $2.9959 \text{ GHz}$  nahezu exakt die vorhergesagte  $\pi$ -Modenfrequenz, war jedoch mit einer Länge von  $49.73 \text{ mm}$  etwas zu kurz.

Die Mischhantel hatte zu Beginn eine Länge von  $53.49 \text{ mm}$  und beide Halbzellen waren etwa gleich lang. Das Verhältnis der elektrischen Feldstärken für

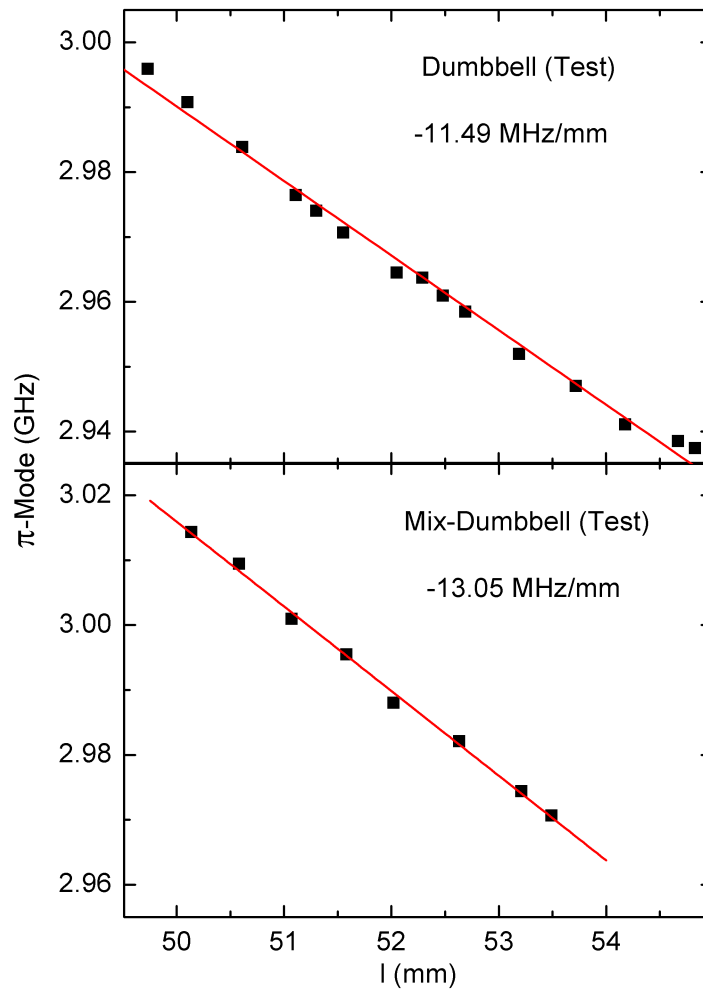


Abb. 5.3: Messung der  $\pi$ -Modenfrequenzen zwischen dem stufenweisen Abdrehen der Test-Hanteln der Länge  $l$ . Die Steigung einer an die Werte angepassten Gerade betrug  $-11.49 \text{ MHz/mm}$  für die Mittelzellenhantel und  $-13.05 \text{ MHz/mm}$  für die Mischhantel. Die Streuung der Werte erklärt sich zum Teil dadurch, dass nicht immer exakt symmetrisch abgedreht wurde.

die  $\pi$ -Mode ergab 0.774, was recht gut der Verteilung von 0.77 aus der Simulation entsprach. Daher wurde dieses Bauteil nun wechselseitig in Schritten von 0.45–0.6 mm abgedreht, dabei schwankte das Verhältnis der elektrischen Felder zwischen 0.707 und 0.774. Die Frequenzänderung durch das Abdrehen wurde wie zuvor durch Anpassung einer Geraden bestimmt und ist ebenfalls in Abb. 5.3 graphisch dargestellt. Der Gradient für das Abdrehen konnte zu  $-13.05$  MHz/mm bestimmt werden. Nach dem letzten Abdrehschritt lag die Resonanzfrequenz der  $\pi$ -Mode mit 3.0144 GHz nahe an dem Wert aus der Simulation, allerdings war die Mischhantel mit 50.135 mm etwas zu lang.

### 5.4.3 Hanteln und Endgruppen für die Produktion

Nachdem diese Tests beendet waren, begann der Hersteller alle Baugruppen zu fertigen. Für drei Kavitäten wurden insgesamt 51 Mittelzellenhanteln, 6 Mischhanteln und 6 Endgruppen, die aus einer Endhalbzelle mit angeschweißtem cut-off-Rohr bestehen, hergestellt. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten HF-Messungen an den Bauteilen fiel auf, dass die Frequenzen und Längen von denen der Testhantel abwichen. Zur Verdeutlichung sind in Abb. 5.4 die  $\pi$ -Modenfrequenzen aller Hanteln aus zwei Mittelhalbzellen über deren Länge aufgetragen. Die Frequenzen lagen ca. 10.5 MHz höher als die bei vergleichbarer Länge gemessenen Resonanzfrequenzen der Test-Hantel. Die Frequenzen der Mischhanteln hingegen zeigten keine signifikante Abweichung von den Messwerten mit dem Testbauteil. Bei beiden Hanteltypen wurde das angestrebte Verhältnis der elektrischen Feldstärken in ihren Halbschalen sehr gut erreicht. Bei vielen lagen die Abweichungen im Bereich unter 2%, und bis auf eine einzige Hantel mit 10% Abweichung, wichen alle um weniger als 5% von der idealen, symmetrischen Feldverteilung ab. Eine Liste mit den Ergebnissen dieser Messungen ist in Anhang C zu finden.

Um den Gradienten für das Abdrehen der Hanteln ein letztes mal zu überprüfen, wurden nochmals drei Hanteln aus Mittelhalbzellen abgedreht und die Frequenzen gemessen. Auch das Abdrehen einer Endgruppe wurde in diesem Arbeitsgang durchgeführt. Da jedoch alle Bauteile für die Produktion der Kavitäten vorgesehen waren, durfte nur soviel abgedreht werden, dass noch genügend Reserve blieb um den Rezess für die Schweißvorbereitung drehen zu können. Die Hanteln wur-

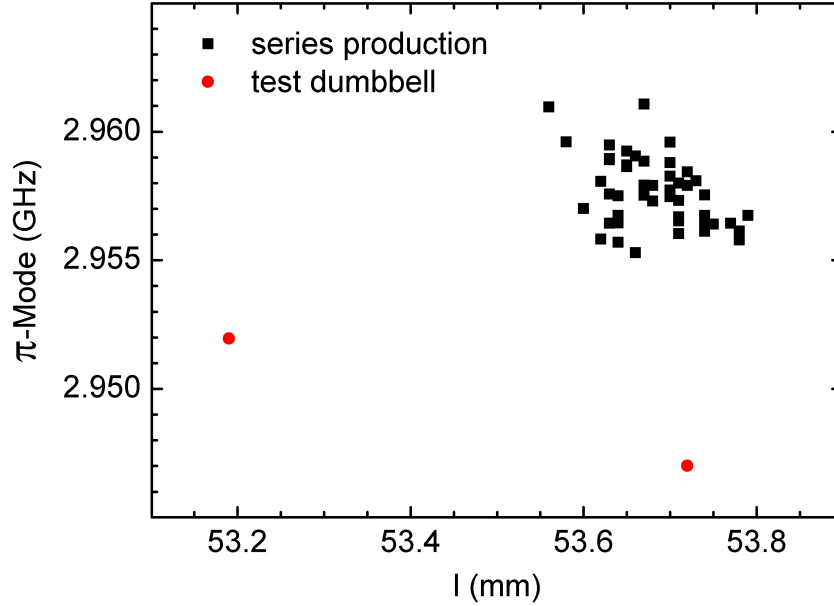


Abb. 5.4: Längen und Resonanzfrequenzen der  $\pi$ -Mode aller Mittelzellenhanteln [35]. Die Frequenzen der Hanteln der Serienproduktion lagen ca. 10.5 MHz höher als die der Testhantel bei vergleichbarer Länge.

den jeweils zu gleichen Teilen von beiden Seiten gekürzt, bevor die Frequenzmessungen erfolgten. Abbildung 5.5 zeigt die Messung an zwei Hanteln, die in drei Schritten abgedreht wurden. Aus einer linearen Anpassung durch die Messpunkte ergeben sich Gradienten von  $-11.53$  MHz/mm und  $-11.44$  MHz/mm. Die dritte Hantel wurde nur einmal um 1 mm abgedreht. Aus der Differenz der Frequenzen ergab sich hier  $-11.5$  MHz/mm. Durch diese drei Vergleichswerte konnte der für die Testhantel ermittelte Gradient bestätigt werden und wurde zur Berechnung der Abdrehmaße, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, verwendet.

Die Endgruppen bestehen aus dem 141 mm langen cut-off-Rohr und einer angeschweißten Endhalbzelle (Solllänge 25 mm). Sie wurden mit der Halbzelle nach unten auf den Messstand für die Hanteln angebracht. Von der cut-off-Rohr Seite wurde die gleiche Antennenvorrichtung eingebracht, wie sie auch für Frequenzmessungen an kompletten S-DALINAC-Kavitäten verwendet wird [51]. Abbildung 5.6 zeigt die gemessenen Resonanzfrequenzen nachdem jeweils wenige Zehntel Millimeter abgedreht wurden. Der Gradient ergab sich hierbei zu  $-19$  MHz/mm. Nimmt man diesen Wert für alle 6 Endgruppen an, so ergäben sich nach dem Abdrehen auf ihre Solllänge von 166 mm Resonanzfrequenzen zwischen 2.9638 und 2.9725 GHz. Der Mittelwert liegt nur 1.2 MHz unter dem von der Simulati-



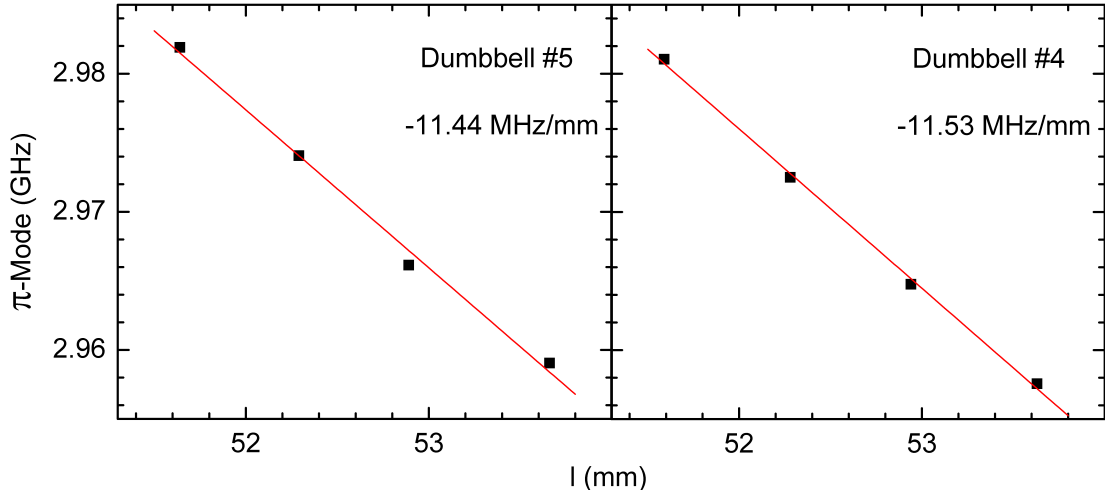


Abb. 5.5: Ergebnisse vom Abdrehen zweier Mittelzellenhanteln aus der Serienproduktion [35], um den Frequenzgradienten nochmals zu überprüfen.

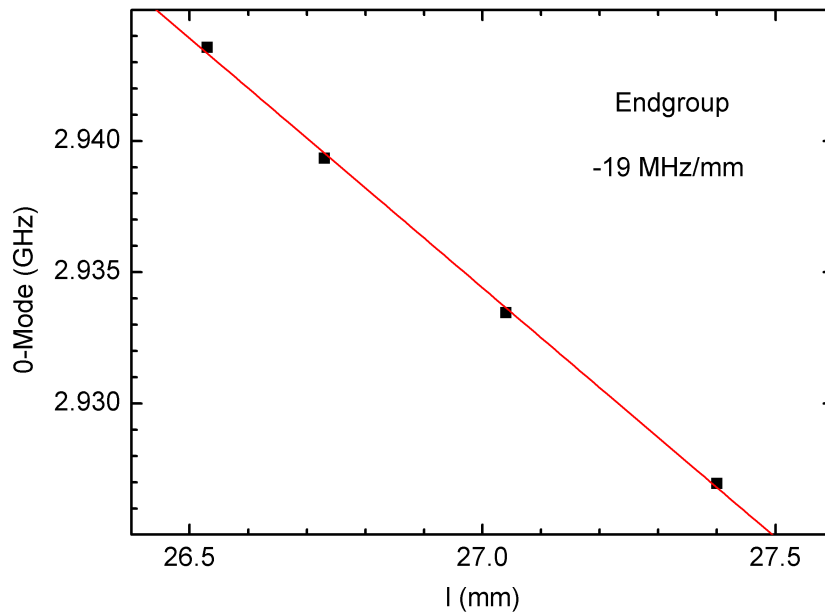


Abb. 5.6: Resonanzfrequenz einer Endgruppe aufgetragen über die Länge der Halbzelle. Durch eine linearen Anpassung konnte der Abdrehgradient zu  $-19 \text{ MHz/mm}$  bestimmt werden.

on vorhergesagten Wert für die Resonanzfrequenz. Diese gute Übereinstimmung führte dazu, dass der ermittelte Abdrehgradient für die Endgruppen für die weitere Berechnung verwendet wurde.

## 5.5 Herstellung der ersten Kavität

### 5.5.1 Berechnung der Abdrehmaße

Nachdem die Resonanzfrequenzen und die Längen aller Bauteile gemessen waren, musste entschieden werden, um wieviel diese gekürzt werden sollten. Eine Mittelzellenhantel muss für die Produktion durch Abdrehen und Strecken oder Stauchen eine Gesamtlänge von 50 mm bei einer  $\pi$ -Modenfrequenz von 2.996 GHz erreichen. Der aus der vergangen Produktion bekannte Gradient für das Strecken und Stauchen einer 1 m langen Kavität von  $\pm 0.5$  MHz/mm lässt sich dabei für eine Hantel auf  $\pm 10$  MHz/mm extrapolieren. Der Gradient für das Abdrehen wurde nach den oben beschriebenen Messungen mit  $-11.5$  MHz/mm veranschlagt. Mit diesen Daten lässt sich die Länge  $d$ , um die die Hantel abgedreht werden muss, durch das folgende Gleichungssystem bestimmen:

$$\begin{aligned}\Delta l &= d + s \\ \Delta f &= d \cdot 11.5 \text{ MHz/mm} - s \cdot 10 \text{ MHz/mm}\end{aligned}\tag{5.5}$$

Wobei  $s$  die Strecke ist, um die die Hantel gestaucht oder gestreckt wird. Da alle Hanteln, wie oben beschrieben, eine etwas zu hohe Ausgangsfrequenz hatten, musste nach dem Abdrehen etwas Überlänge übrig bleiben, um sie durch Stauchen auf die Zielfrequenz zu bringen. Die Parameter  $\Delta l$  und  $\Delta f$  wurden zunächst wie folgt berechnet:

$$\Delta l = 50 \text{ mm} - l\tag{5.6}$$

$$\Delta f = 2.996 \text{ GHz} - f\tag{5.7}$$

Hierbei sind  $l$  und  $f$  die gemessene Länge und Resonanzfrequenz der  $\pi$ -Mode der Hantel vor dem Abdrehen. Für die Praxis muss man jedoch berücksichtigen, dass eine Schweißung zum Zusammenfügen der Bauteile erforderlich ist. Durch das Schweißen schrumpft die Kavität, hierfür wurden pro Schweißnaht 0.35 mm veranschlagt. Außerdem mussten als Schweißvorbereitung Rezesse, wie in Abb. 5.7 gezeigt, von 0.5 mm Tiefe an jede Seite der Hanteln gedreht werden. Somit ergab sich als Abdrehmaß nicht die aus den Gln. (5.5) berechnete Länge  $d$ , sondern der reduzierte Wert

$$\tilde{d} = d - 0.5 \text{ mm} - 0.35 \text{ mm}.\tag{5.8}$$



Abb. 5.7: Darstellung und Foto des Rezesses, der in die Hanteln zur Schweißvorbereitung gedreht wurde.

Da der Prozess des Elektronenstrahlschweißens nicht nur, wie das Abdrehen, eine reine Längenänderung verursacht, sondern auch eine Verformung der Zellengeometrie bewirkt, musste damit gerechnet werden, dass die  $\pi$ -Modenfrequenz der fertigen Kavität höher ausfällt als geplant. Aus diesem Grund wurde eine um 5 MHz tiefere Frequenz als Zielfrequenz zur Berechnung der Abdrehmaße benutzt, damit die Kavität nach dem Schweißen nicht bei einer zu hohen Resonanzfrequenz endet. In Gl. (5.7) wurde  $\Delta f$  deshalb mit

$$\Delta f = 2.991 \text{ GHz} - f \quad (5.9)$$

um 5 MHz nach unten korrigiert. Dieser Wert kam durch eine Skalierung der Erfahrungswerte mit 1.3 GHz TESLA Kavitäten [52] zustande.

Für die Endgruppen und Mischhanteln wurden die Rechnungen äquivalent mit den entsprechenden Gradienten und Zielfrequenzen durchgeführt. Da für diese Bauteile jedoch keine Gradienten für Strecken oder Stauchen vorlagen, wurden diese durch die für das Abdrehen bestimmten Gradienten abgeschätzt. Dies erschien gerechtfertigt, da diese Werte für die Mittelzellenhanteln nahezu übereinstimmen. Da die Hanteln, wie schon erwähnt, eine ausreichend gute Feldsymmetrie aufwiesen, wurde jeweils die Hälfte des berechneten Abdrehmaßes  $\tilde{d}$  von beiden Hantelseiten abgedreht.

### 5.5.2 Fertigstellung der ersten Kavität

Nachdem alle Bauteile für die erste Kavität abgedreht waren, wurden wiederum Länge und Frequenz aller Bauteile gemessen. Als Reihenfolge für das Zusammenschweißen wurde entschieden, immer eine Hantel mit höheren Resonanzfrequenzen an eine mit niedrigeren Frequenzen anzubringen. Mit diesem Vorgehen konnte, wie in Abb. 5.8 gezeigt, bereits nach dem Schweißen eine relativ gute Feldglattheit erreicht werden. Die Messung des Feldprofils wurde mit dem Verfahren aus [51] und dem dafür verbesserten Aufbau aus [53] durchgeführt, nach dem auch im weiteren Verfahren die Feldglattheit eingestellt wurde.

Die Hanteln waren nach dem Abdrehen etwas kürzer als geplant, wodurch auch die fertige Kavität kürzer ausfiel. Anhand der Längenmessung konnte ein Schweißschrumpf von ca. 0.3 mm pro Schweißnaht ermittelt werden. Im Zuge des anschließenden Stauchens der Kavität, das so durchgeführt wurde, dass sich gleichzeitig die Feldglattheit der Struktur verbesserte, zeigte sich, dass der Gradient hierfür ca.  $-700$  kHz/mm anstelle der angenommenen  $-500$  kHz/mm betrug. Die chemische Behandlung (BCP) wurde beim Hersteller in zwei Schritten durchgeführt, um den Gradienten für das Tunen durch Materialabtrag zu überprüfen. Aus dem

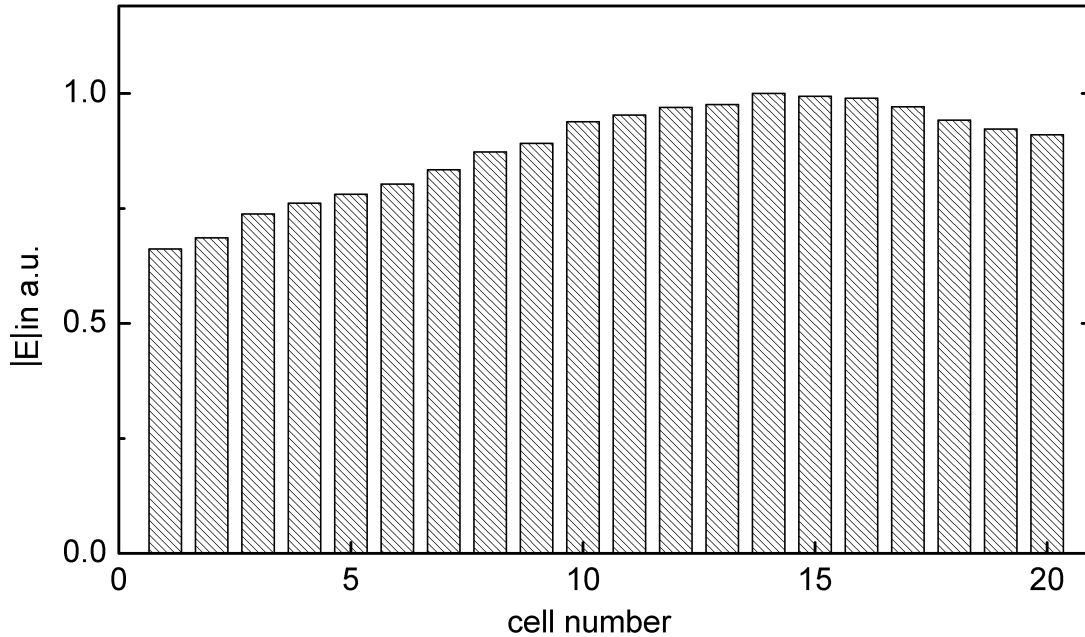


Abb. 5.8: Feldprofil der  $\pi$ -Mode der ersten Kavität nach dem Schweißen [35]. Der Betrag des elektrischen Felds ist in relativen Einheiten dargestellt.

Abtrag der ersten 120  $\mu\text{m}$  ergab sich eine Frequenzänderung von -2.7 MHz, so dass der Gradient  $-22.5 \text{ kHz/mm}$  betrug. Um die Resonanzfrequenzen weiter zu senken, wurden gezielt nochmals 60  $\mu\text{m}$  weggeätzt. Danach war die Kavität immer noch etwas zu lang und die  $\pi$ -Modenfrequenz zu hoch, so dass durch weiteres Komprimieren der Struktur schließlich die Zielfrequenz bei nahezu richtiger Länge erreicht werden konnte. Bei diesem Arbeitsschritt fiel auf, dass der Gradient für das Stauchen nach der chemischen Behandlung diesmal mit  $-460 \text{ kHz/mm}$  wieder näher an dem Wert aus der früheren Fertigung lag. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass durch den chemischen Abtrag die Geometrie auf der Innenseite der Kavität nun wieder, wie vorausgesagt, der der früheren Produktionsreihe entspricht. An diesem Punkt konnte mit den üblichen Verfahren der Behandlungen von Kavitäten am S-DALINAC fortgefahren werden. Dazu gehörte auch das Entfernen von Wasserstoff [40] aus dem Niob mit Hilfe eines Ultra-Hochvakuum-Ofen [54], in dem die Beschleunigungsstruktur über mehrere Tage bei  $650^\circ\text{C}$  ausgeheizt wurde. Tabelle 5.3 listet die gemessenen Längen und die  $\pi$ -Modenfrequenzen nach jedem einzelnen Schritt auf. Mit 1000.4 mm wurde die gewünschte Länge praktisch genau getroffen, bei der mit einer Methode zu besseren Überprüfung der Feldglattheit [55], diese eingestellt werden konnte. Dabei lag die mittlere Abweichung des Betrags der elektrischen Feldstärken in jeder Zelle

Tab. 5.3: Länge und Resonanzfrequenz der 1. Kavität nach den verschiedenen Arbeitsschritten.

Produktionsschritt	Länge (mm)	$\pi$ -Mode (GHz)
Gesteckt, vor dem Schweißen	1012.57	-
Elektronenstrahlschweißen	1006.80	3.00124
Stauchen	1002.45	2.99815
Erste BCP (120 $\mu\text{m}$ )	-	2.99530
Zweite BCP (60 $\mu\text{m}$ )	1004.45	2.99456
Stauchen & Feldglattheit	999.70	2.99238
Ausheizen in UHV-Ofen	1000.30	2.99297
Feldglattheit	1000.40	2.99234

von deren Mittelwert

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \frac{||E_i| - \overline{|E|}|}{|\overline{E}|} \quad (5.10)$$

bei lediglich 2.2 Prozent. Nach einer letzten „sanften Chemie“ (Abtragen einer extrem dünnen Oberflächenschicht), Spülen mit Reinstwasser und Trocknen in Reinraum-Atmosphäre [56] war die Kavität zum Einbau bereit.

## 5.6 Herstellung der Kavitäten Nr. 2 und 3

Mit den Erkenntnissen aus der Fertigung der ersten neuen Kavität wurde nun das Abdrehen der restlichen Bauteile für die beiden anderen Strukturen in Auftrag gegeben. Aufgrund der guten Erfahrungen mit der ersten Kavität sollten im Mittel die gleichen Längen und Frequenzen für die Hanteln nach der Bearbeitung erreicht werden. In Abb. 5.9 werden die Ergebnisse aus den beiden Produktionsreihen gegeneinander dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Resonanzfrequenzen der  $\pi$ -Mode deutlicher höher lagen als bei der vorherigen Charge. Auch die gemes-

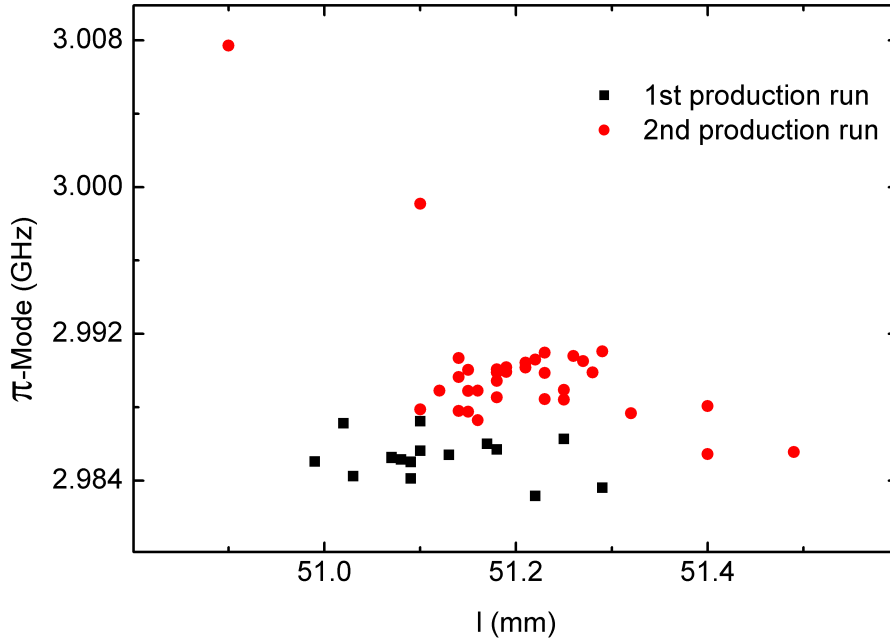


Abb. 5.9: Länge und Resonanzfrequenz der  $\pi$ -Mode aller Hanteln aus Mittelhalbzellen nach dem Abdrehen.

senen Längen der Hanteln variierten über einen größeren Bereich. Die Schweißreihenfolge wurde wie bei der ersten Kavität festgelegt, wobei darauf geachtet wurde, dass die mittlere Frequenz der Bauteile für beide Kavitäten gleich war. Nach dem Schweißen wurde direkt eine BCP-Behandlung (100  $\mu\text{m}$  Materialabtrag) durchgeführt. Mit den Erfahrungen aus der Produktion der ersten Kavität wurden, wie in Tab. 5.4 gezeigt, auch die Beschleunigungsstrukturen der zweiten Serie erfolgreich auf die geforderten Sollwerte für die Länge von  $(1000 \pm 2)$  mm und  $\pi$ -Modenfrequenz von 2.992–2.9925 GHz eingestellt.

Tab. 5.4: Länge  $l$  und Resonanzfrequenz  $f_\pi$  der  $\pi$ -Mode von Kavität Nr. 2 und 3 nach verschiedenen Produktionsschritten.

Produktionsschritt	Kavität Nr. 2		Kavität Nr. 3	
	$l$ (mm)	$f_\pi$ (GHz)	$l$ (mm)	$f_\pi$ (GHz)
Schweißen & BCP	1006.3	3.00170	1006.9	3.00010
Stauchen	999.0	2.99730	999.3	2.99600
Zweite BCP	1001.3	2.99390	1001.7	2.99187
Ausheizen & Feldglattheit	999.5	2.99225	1002.0	2.99207

## 6 Montage und erstes Abkühlen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das Design für den neuen Injektorkryostat sowie die neu entwickelten Bauteile vorgestellt. Dieses Kapitel beschreibt nun die Erkenntnisse, die aus dem ersten Abkühlen mit flüssigem Helium gewonnen wurden. Dazu wird zunächst die Montage des Moduls für diesen Test und im Anschluss daran der Aufbau für das Abkühlen außerhalb des Beschleunigers beschrieben. Der Heliumtank wurde an drei aufeinanderfolgenden Tagen jeweils zu 75% seiner Kapazität mit flüssigem Helium befüllt, während am ersten Tag zusätzlich mit Hilfe eines der Pumpstandsmodule des Beschleunigers der Druck auf 35 mbar reduziert wurde, um die Temperatur auf 2 K zu senken. Dieser erste Test sollte sicherstellen, dass die jeweiligen Druckbereiche gut gegeneinander isoliert waren und dass der Wärmeeintrag ins Heliumbad mit den Abschätzungen aus Kap. 3 übereinstimmt. Die Ergebnisse und eine Messung der Kopplergüten werden zum Schluss dieses Kapitels präsentiert.

### 6.1 Montage des Kryostatmoduls für den Testlauf

Für die Testmessung außerhalb des Beschleunigers wurde der Heliumtank mit nur einer Kavität bestückt. Da für die Befüllung ein Heber von oben eingeführt werden musste, wurde an der zweiten Einbauposition keine Kavität angebracht, um keine Beschädigung zu riskieren. Abbildung 6.1 zeigt die bereits fertig montierte Struktur in ihrem Frequenztuner, der in dem Aluminiumrahmen hängt, mit dem er dann in den Heliumtank geschoben wird. Im Vordergrund ist dabei sehr gut der Einkoppler zu erkennen. Als Feintuner wurde ein Stab mit drei Piezoaktuatoren verwendet, deren Positionen an Hand der Kabel zur Spannungsversorgung ebenfalls in Abb. 6.1 zu erkennen sind. Der Heliumtank wurde vorne und hinten mit Blindflanschen versehen und mit Superisolation umschlossen. Die Befüllung mit flüssigem Helium erfolgte durch eine der beiden zusätzlichen Transferleitungen des Moduls. Über die andere konnte das Helium abdampfen bzw. der Gasdruck im Tank auf 35 mbar gesenkt werden.



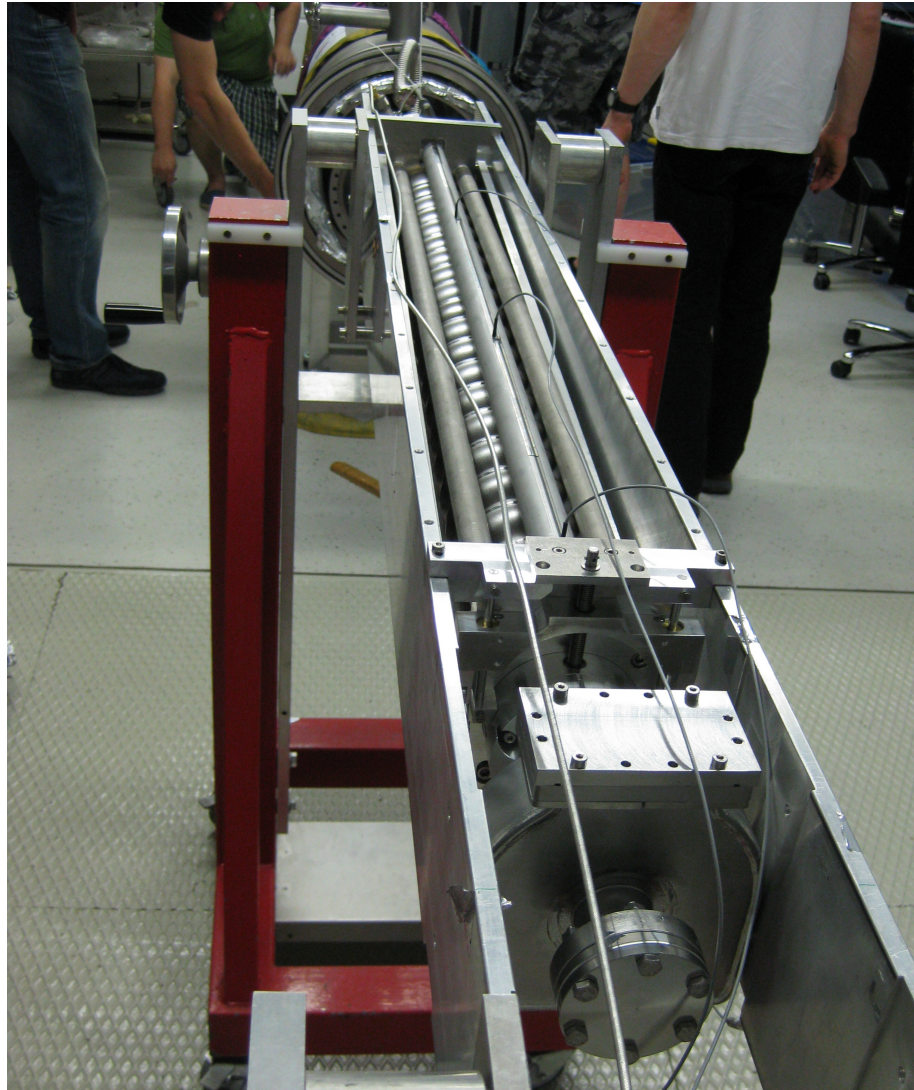


Abb. 6.1: Die zum Test verwendete Kavität RI 1 mit ihrem Frequenztuner. Dieser wurde mit einem Stab mit drei Piezoaktuatoren ausgestattet. Man erkennt die Kabel für die Spannungsversorgung der Piezos und das HF-Kabel, das im Hintergrund an den Auskoppler angeschlossen ist. Im Vordergrund sieht man den mit einem Blindflansch verschlossenen Einkoppler.

Abbildung 6.2 zeigt eine Bildserie vom Aufbau der Turmsektion, nachdem der Schlitten mit Kavität, Tuner und Kopplern in den Heliumtank geschoben wurde. Auf dem ersten Bild ist bereits das unterste Hohlleiterstück an den Einkoppler angeflanscht. Man erkennt außerdem die Motorwelle, die an den Tuner angeschlossen ist, sowie das HF-Kabel, das am anderen Ende der Beschleunigungsstruktur mit dem Auskoppler verbunden ist. Das zweite Bild zeigt den Zustand nach dem Setzen der Dichtungen und dem Anbringen des Heliumtankdeckels. Nach dem Festziehen der Schrauben und dem Arretieren der Membranbälge in ihrer Position wurden dann die nächsten Hohlleiterkomponenten und die Verbindungen für Motorwelle und Kabel montiert (Bild 3). Der Bereich wurde dann mit Superisolation umwickelt und der thermische Kontakt zwischen dem Stickstoffschild und den Transferleitungen hergestellt. Auf Bild 4 ist bereits die Turmsektion des Stickstoffschilds montiert. Nach dem Anbringen weiterer Superisolation (Bild 5) und dem Aufsetzen des äußeren Turms (Bild 6), zeigt Bild 7 den Krystaten mit montiertem Turmdeckel. Im letzten Montageschritt wurde dann das Hohlleiter-Vakuumfenster (Bild 8) installiert. Das HF-Kabel und die Kabel für die Piezosteuerung, Temperatursensoren und Heliumniveausonde wurden mit KF-40 Blinddeckeln mit entsprechenden Durchführungen verbunden und so das Heliumvolumen abgeschlossen.

## 6.2 Aufbau des Kryostatmoduls im Pumpstandsraum des S-DALINAC

Für die Messung wurde das Kryostatmodul in den Pumpstandsraum der Beschleunigeranlage gebracht, wo sich auch ein fest installierter, vertikaler Testkryostat befindet. Dort wurde der Auslass für das gasförmige Helium über Metallwellschläuche an eine Gasheizung angeschlossen. Diese ist erforderlich, um Beschädigungen an Löt- und Schweißnähten des Heliumrückgewinnungssystems des S-DALINAC zu vermeiden. Auch darf kein kaltes Gas in das Pumpstandsmodul gelangen, das benötigt wird um den Dampfdruck für eine 2 K Messung auf 35 mbar zu reduzieren. Abbildung 6.3 zeigt das Modul im Pumpstandsraum.



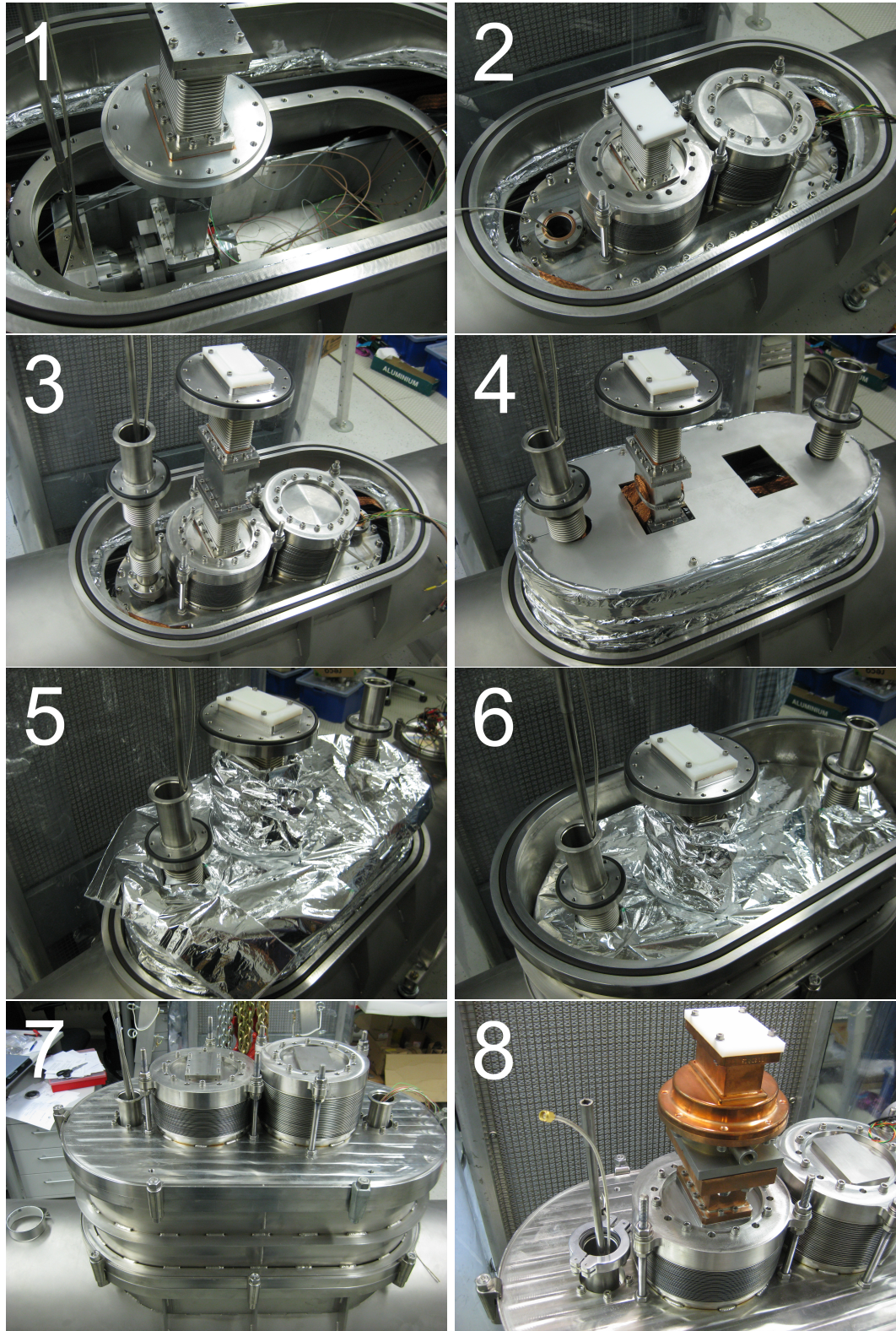


Abb. 6.2: Zusammenbau des Kryostaten für den ersten Kalttest. Eine ausführliche Beschreibung erfolgt im Text.

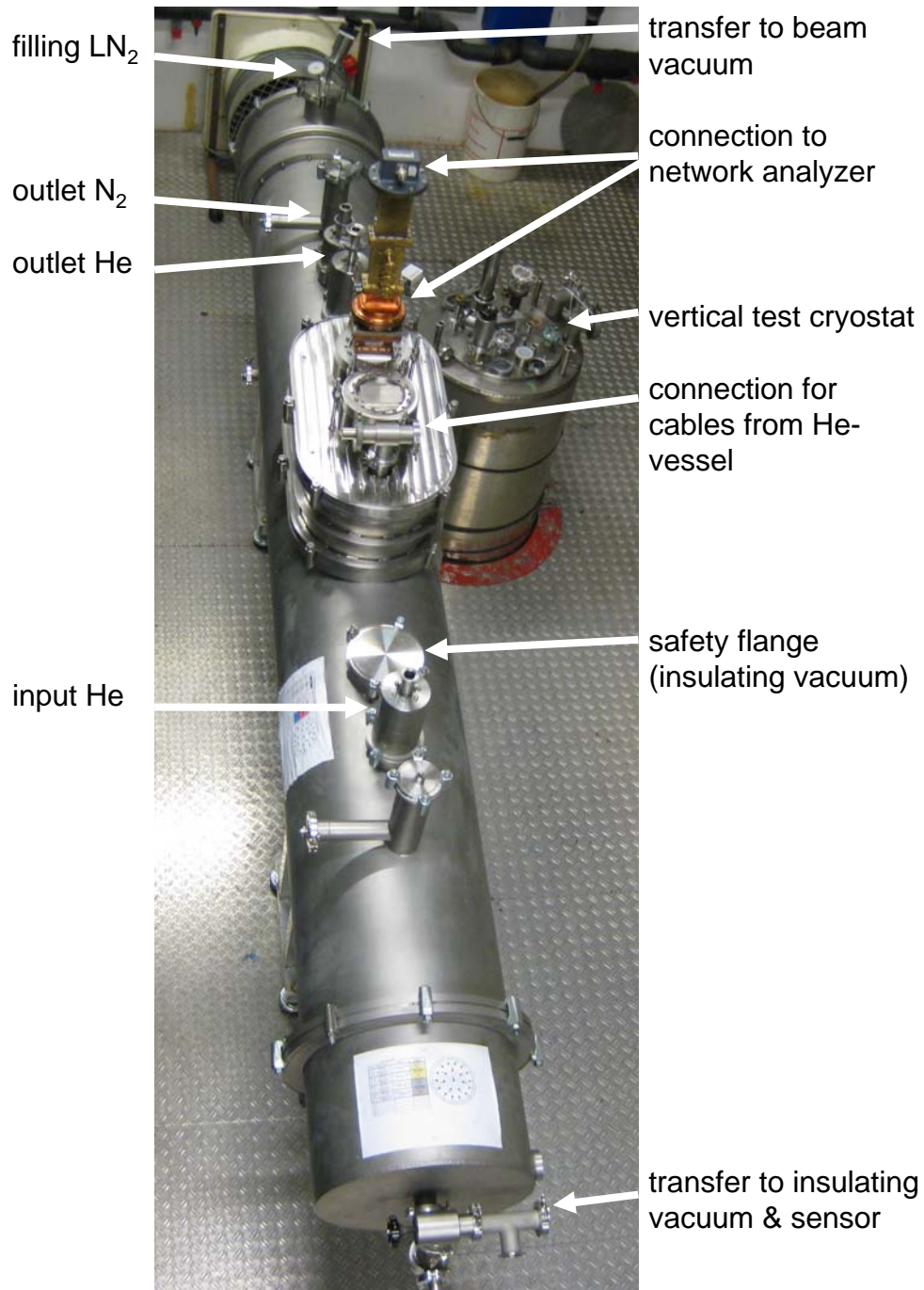


Abb. 6.3: Foto des neuen Kryostatmoduls vor der Kaltmessung. Mit den Abschlusskappen für das Isoliervakuum vorne und hinten ist das Modul etwa 3.7 m lang. Rechts in den Boden eingelassen erkennt man den oberen Teil des vertikalen Testkryostaten. Zur besseren Übersicht wurde das Foto vor dem Anschließen aller nötigen Leitungen und Kabel aufgenommen.



Zur Erfassung der Temperaturen während des Tests wurden innerhalb des Moduls insgesamt sieben Temperatursensoren verbaut. Davon vier an verschiedenen Stellen im Heliumtank, zwei am vorderen Ende des Stickstoffschilds wie in Abschn. 4.1 beschrieben sowie einer an der Abdampfleitung des Stickstoffschilds, um erkennen zu können, wann eine erneute Befüllung erforderlich ist. Die Sensoren (Modell DT-670A-CU-HT) wurden mit Hilfe eines Temperaturmonitors (Modell 218 von LakeShore) ausgelesen und zusammen mit den Daten der Heliumniveausonde in die Datenbank des Beschleunigers [57] geschrieben. Zur Überwachung des Kryostatdrucks wurde an einer Transferleitung ein Manometer installiert. Über entsprechende Adapter wurden die Ein- und Auskoppelleitung mit flexiblen HF-Kabeln an einen Netzwerkanalysator angeschlossen. Ein magnetgelagerter Turbomolekularpumpstand wurde zum Abpumpen des Strahlvakuums verwendet. Neben dem Totaldruck konnten mit Hilfe eines Massenspektrometers vom Typ DYCOR LC-D100 auch die Partialdrücke im Strahlvakuum überwacht werden. Das Isoliervakuum wurde ebenfalls mit einem Turbopumpstand evakuiert. Auch hier wurde eine Drucküberwachung angebracht.

## 6.3 Abkühlen des Moduls

Zum Abkühlen des Kryostatmoduls wurde mit der Befüllung des Stickstoffschilds über ein Wochenende begonnen. Abbildung 6.4 zeigt den Verlauf von drei der sieben gemessenen Temperaturen ab dem Beginn der Stickstoffbefüllung bei  $t = 0$ . Erst zum Zeitpunkt  $t = 74$  h wurde mit dem Einlass von kaltem Heliumgas aus einer 200 Liter Kanne begonnen. Davor befand sich lediglich Helium bei Zimmertemperatur im Heliumtank. Die Temperaturen  $T_5$  und  $T_6$  entsprechen den Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  aus Abschn. 4.1. Durch Befüllung des Stickstoffschilds kühlte die gesamte Masse des Heliumtanks um ca. 50 K ab. Zur besseren Übersicht wird nur eine der Temperaturen des Heliumsystems (Temperatur  $T_2$ ) in Abb. 6.4 dargestellt. Dieser Sensor befand sich direkt am Einkoppler, also etwa in der Mitte des Moduls. Der flüssige Stickstoff im Schildvolumen war während der ersten 74 Stunden deutlich schneller verbraucht als beim Test ohne Heliumtank. Dies ist deutlich am Verlauf der Temperaturen  $T_5$  und  $T_6$  zu erkennen. Sie

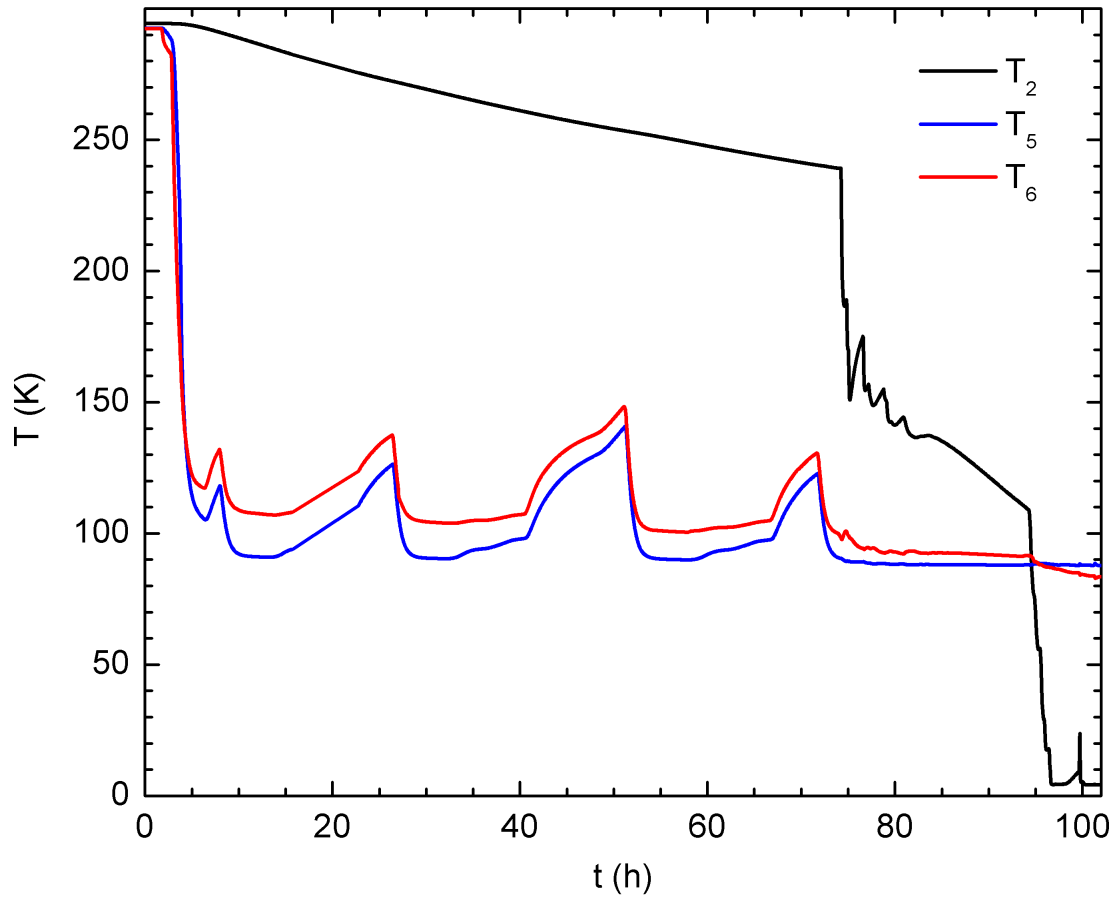


Abb. 6.4: Abkühlkurven für das neue Kryostatmodul. Die Temperaturen  $T_5$  und  $T_6$  wurden am Stickstoffschild,  $T_2$  im Heliumtank gemessen. Bei  $t = 74$  h wurde mit dem Einlass von kaltem Heliumgas begonnen, davor wurde lediglich der Stickstoffschild abgekühlt. Zum Zeitpunkt  $t = 94$  h wurde dann der Heliumtank mit flüssigem Helium gefüllt.

stiegen an, sobald der flüssige Stickstoff verdampft war, und fielen dann durch tägliches Befüllen des  $\text{LN}_2$ -Volumens wieder auf ihre ursprünglichen Werte. Erst nachdem zum Zeitpunkt  $t = 94$  h die Temperatur im Heliumtank unter 77 K fiel, nahm auch der Wärmeeintrag in den Stickstoffschild ab und dieser musste, solange der Heliumtank abgekühlt war, nicht mehr befüllt werden. Auch lagen vom Zeitpunkt  $t = 100$  h bis zum Wiederaufwärmen die tiefsten Werte für  $T_5$  und  $T_6$  bei 83 K, vergleichbar zum Test aus Abschn. 4.1. Zum Zeitpunkt  $t = 94$  h war dann der Heliumtank kalt genug und es wurde mit dem Einlass von flüssigem Helium begonnen.

Vor Beginn des Abkühlens wurde die Resonanzfrequenz der  $\pi$ -Mode und  $19\pi/20$ -Mode mit einem Netzwerkanalysator aufgenommen. Im warmen Zustand musste dabei ein HF-Verstärker verwendet werden, um die Resonanzen in Transmission zu erkennen. Während des Abkühlens wurden weiterhin die Resonanzfrequenzen ausgelesen. In Abb. 6.5 sind diese Werte über der am Einkoppler gemessenen Temperatur aufgetragen. Zwar war nicht immer davon auszugehen, dass sich die gesamte Kavität exakt auf der am Einkoppler gemessenen Temperatur befand, jedoch zeigte der Verlauf der Messwerte deutlich, wie die Resonanzfrequenzen mit fallender Temperatur anstiegen. Entscheidend bei dieser Messung war festzustellen, wie weit sich die Resonanzfrequenz der  $\pi$ -Mode im Vergleich zu ihrer Einstellung bei Zimmertemperatur durch Evakuieren und Abkühlen auf ihre Betriebstemperatur verschiebt. Hierzu sind in Tab. 6.1 die wichtigsten Daten aus den Messungen zusammengefasst. Dabei steigt die Frequenz um knapp 900 kHz gemäß

$$f_{\text{vakuum}} = \sqrt{\epsilon} \cdot f_{\text{N}_2} \quad (6.1)$$

durch das Evakuieren der Kavität, wobei  $\epsilon$  für Stickstoff bei Raumtemperatur und Normaldruck ca. 1.0006 beträgt. Weitere 4.5 MHz Frequenzerhöhung resultieren aus der Volumenabnahme durch Kontraktion zwischen 295 K und 2 K. Die

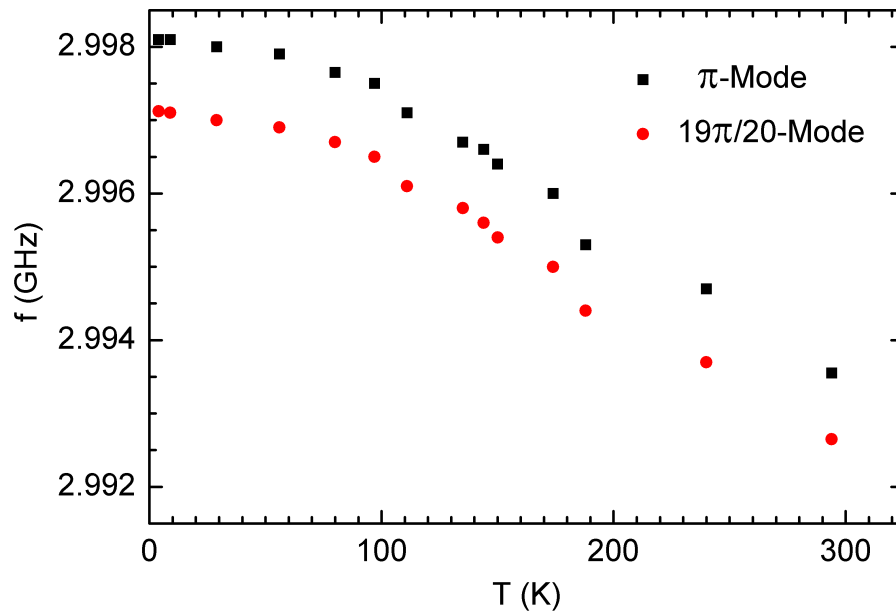


Abb. 6.5: Änderung der Resonanzfrequenzen von  $\pi$ - und  $19\pi/20$ -Mode in Abhängigkeit von der Temperatur.

Tab. 6.1: Gemessene Resonanzfrequenzen der Kavität unter verschiedenen Bedingungen.

Zustand	Temperatur (K)	$\frac{19}{20}\pi$ -Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)
Belüftet mit N <sub>2</sub>	295	2.9918	2.99266
Evakuiert	295	2.99265	2.99355
Evakuiert	80	2.99670	2.99765
Evakuiert	2	2.99712	2.99809

Differenz zwischen 80 K und 2 K beträgt dabei nur 0.44 MHz. Zusammengefasst liegt die Resonanzfrequenz der  $\pi$ -Mode im Betrieb somit 5.4 MHz höher als bei der Einstellung der Kavität im warmen und belüfteten Zustand.

### 6.3.1 Kopplergüten bei 4 K

Nachdem der Heliumtank soweit gefüllt war, dass Kavität und Koppler komplett von flüssigem Helium bedeckt waren, konnte eine Messung der Kopplergüten vorgenommen werden. Hierfür wurde ein Netzwerkanalysator PNA N5230A von Agilent Technologies verwendet und seine Anschlüsse (Ports) mit Hilfe von Koaxialkabeln mit der Ein- und Auskopplerleitung am Kryostatmodul verbunden. Zuvor war eine Kalibration durchgeführt worden, um die Einflüsse dieser Kabel auf die Messung zu eliminieren. Im Anschluss fand die Messung der Streumatrixelemente ( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ) im Frequenzbereich der  $\pi$ -Mode statt, wobei diese durch das Verhältnis

$$S_{ji}(f) = \frac{b_j}{a_i} \quad (6.2)$$

zwischen den Amplituden der am Port  $j$  auslaufenden Welle  $b_j$  und der am Port  $i$  einlaufenden Welle  $a_i$  definiert sind. Abbildung 6.6 zeigt die Ergebnisse dieser Messung als Darstellung der Betragsquadrate  $|S_{ji}|^2$ , also dem Verhältnis zwischen ausgekoppelter und eingekoppelter Leistung. Ebenfalls in der Abbildung dargestellt, ist das Ergebnis einer Anpassung von Phase und Amplitude mit Hilfe des Programms GWignerfit [42] an die Messdaten. Für eine isolierte Resonanz eines



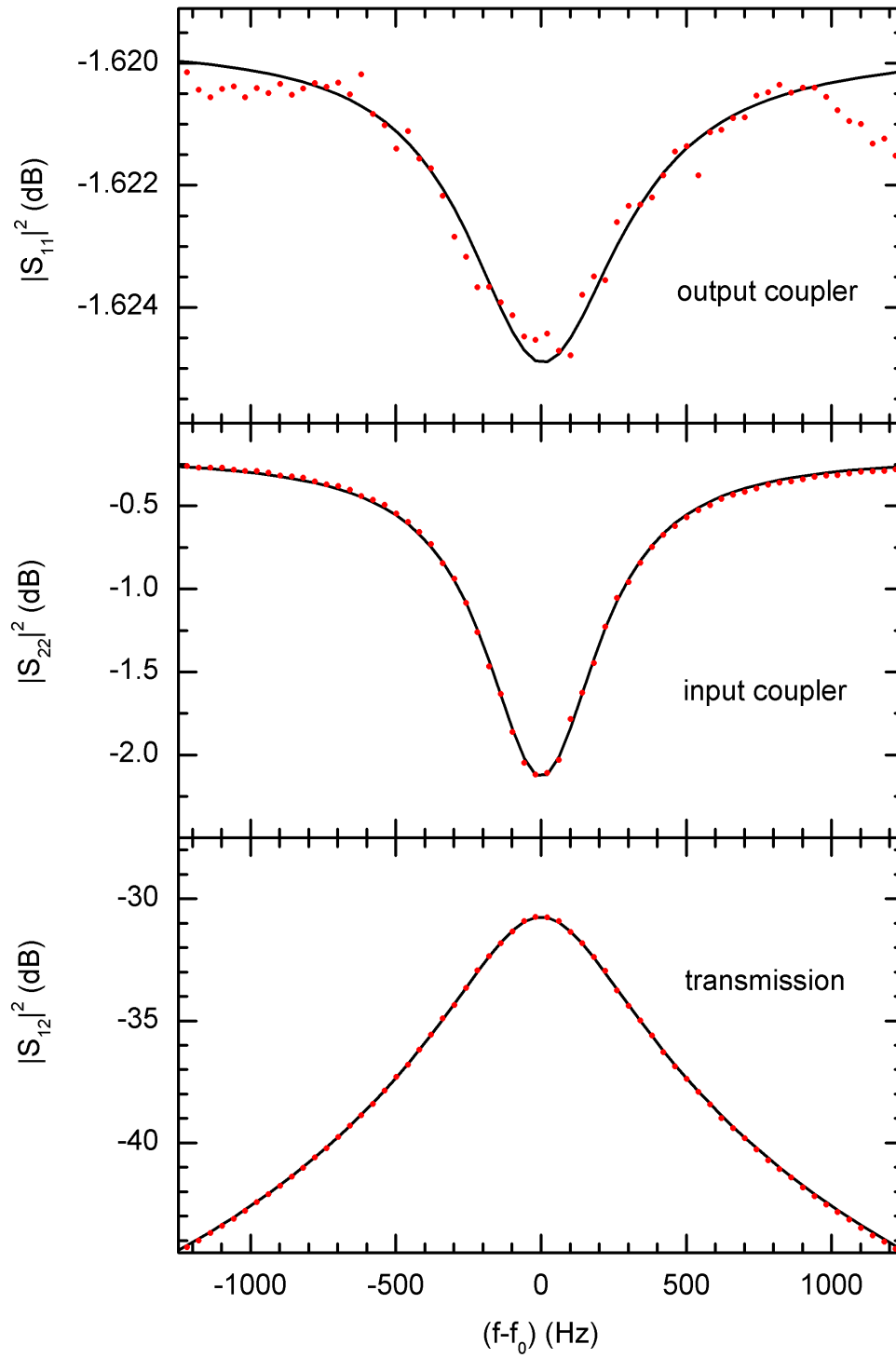


Abb. 6.6: Frequenzspektren in Reflexion und Transmission. Punkte (rot): Messung mit Kavität im Kryostatmodul bei 4.2 K. Schwarze Linie: Anpassung von Gl. (6.3) an die experimentell gemessenen Streumatrixelemente.

Resonators mit zwei Kopplern ergibt sich für die Elemente der Streumatrix [58]

$$S_{ji} = \delta_{ji} + i \frac{\sqrt{\Gamma_j \Gamma_i}}{f - f_0 - i\Gamma/2} \quad \text{mit} \quad \Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_\Omega. \quad (6.3)$$

Dabei sind  $f_0$  die Resonanzfrequenz,  $\Gamma_1$  und  $\Gamma_2$  die Partialbreiten von Ein- und Auskoppler und  $\Gamma_\Omega$  entspricht den Ohmschen Verlusten. Die so aus der Anpassung gewonnenen Partialbreiten haben die Einheit Hz und hängen über

$$Q_i = \frac{\Gamma_i}{f_0} \quad (6.4)$$

mit den jeweiligen Güten zusammen. Auf diese Weise konnte die Güte des Einkopplers zu  $6.25 \cdot 10^6$  bei einem relativen Fehler von 1.5% bestimmt werden. Dies bedeutet, dass die gemessene Güte sehr nah an dem Wert von  $5 \cdot 10^6$  liegt für den der Koppler ausgelegt wurde [28]. Für den Auskoppler, der nach [27] eine Güte von  $1.3 \cdot 10^{10}$  haben sollte, konnte ein Wert von  $1.55 \cdot 10^{10}$  bei einem relativen Fehler von 15% ermittelt werden. Die Messungen wurden bei 2 K wiederholt, waren jedoch durch Vibration des Pumpstandsmoduls unmittelbar neben dem Kryostatmodul gestört. Eine starke Mittelung der Messwerte war daher erforderlich, so dass die Ergebnisse nicht genauer als bei 4.2 K ausfielen, allerdings im Rahmen der angegebenen Fehler konsistent waren.

### 6.3.2 Verlustleistung im Heliumtank

Der Wärmeeintrag in den Heliumtank des neuen Kryostatmoduls konnte über seine Heliumabdampftrate bestimmt werden. Dies geschah mit Hilfe einer im Heliumrückgewinnungssystem des S-DALINAC verbauten Gasuhr. Der so gemessene Volumendurchsatz kann mit Hilfe der Dichte in einen Massendurchsatz umgerechnet werden. Dafür wurde die Dichte von Helium bei 300 K verwendet, da die Gasheizung vor der Heliumrückleitung dafür sorgte, dass das Helium an der Gasuhr bereits Raumtemperatur erreicht hatte. Mit der temperaturabhängigen Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_T$  von Helium konnte so die Verlustleistung an das Heliumbad über

$$P = \Delta H_{(T)} \cdot \rho_{(T)} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (6.5)$$

bestimmt werden. Während des Abkühlens waren die Verluste zunächst größer, jedoch konnten, nachdem der Heliumtank gut gefüllt war und sich ein thermisches

Gleichgewicht eingestellt hatte, Abdampfzeiten von  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  bei  $2 \text{ K}$  gemessen werden. Unter Verwendung von  $\Delta H_{(2\text{K})} = 23.4 \text{ kJ/kg}$  und  $\rho_{(300\text{K})} = 0.1604 \text{ kg/m}^3$  wurde die Verlustleistung zu  $5.2 \text{ W}$  bestimmt. Über einen größeren Zeitraum wurden dann die Abdampfzeiten bei  $4.2 \text{ K}$  beobachtet. Diese lagen im Mittel bei  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ . Zusammen mit der Verdampfungsenthalpie bei dieser Temperatur von  $\Delta H_{(4.2\text{K})} = 20.84 \text{ kJ/kg}$  ergibt sich daraus eine Verlustleistung von  $5.6 \text{ W}$ . Die statischen Verluste des Kryostatmoduls mit einer HF-Leitung liegen also unterhalb von  $6 \text{ W}$ . Nach den Abschätzungen aus Kap. 3 wurde eine Verlustleistung von ca.  $5 \text{ W}$  für ein Modul mit nur einer Hohlleitertransferleitung erwartet. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass beim Einsatz im Beschleuniger eine bessere thermische Isolierung gegeben ist, da der Heliumtank dann vorne und hinten auch durch den Stickstoffschild und die benachbarten Kryostatmodule abgeschirmt ist. Zusätzlich sorgen die leistungsstärkeren Turbomolekularpumpen am S-DALINAC für ein besseres Isoliervakuum als es bei diesem Test der Fall war. Insofern befindet sich das Ergebnis dieses Tests in Übereinstimmung mit den Abschätzungen und es kann davon ausgegangen werden, dass das neue Kryostatmodul die Anforderungen von maximal  $6 \text{ W}$  statischen Verlusten im Betrieb auch mit beiden Hohlleitertransferleitungen erfüllt.

Insgesamt wurde der Heliumtank noch an zwei weiteren Tagen abgekühlt und gefüllt und für weitere Messungen mit den am Frequenzuner verbauten Piezoaktuatoren im Rahmen einer weiteren Arbeit [36] genutzt. Dabei befand sich das Strahlvakuum immer im Bereich  $10^{-8} \text{ mbar}$  und der Partialdruck von Helium stieg lediglich leicht an und stellte nicht den dominierenden Anteil im Restgas dar. Es konnte also weder bei normalflüssigem noch bei suprafluidem Helium ein Kaltleck [59] nachgewiesen werden. Somit war sichergestellt, dass der Aufbau den Anforderungen für den Einbau in den S-DALINAC entspricht.

## 7 Schlussbemerkung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neues Kryostatmodul für den S-DALINAC entwickelt, gefertigt und erfolgreich getestet. Mit seiner Hilfe wird es in Zukunft möglich sein, am Injektormessplatz DHIPS mit höheren Strahlströmen von bis zu  $250\ \mu\text{A}$  und Strahlenergien von bis zu  $14\ \text{MeV}$  zu experimentieren. Die Konstruktion musste hierfür neu entwickelte Einkoppler integrieren und verfügt über eine neue HF-Leitung aus WR-284 Rechteckhohlleitern, die bis in den Heliumtank führt und es von nun an ermöglicht eine Hochfrequenzleistung von bis zu  $2\ \text{kW}$  einzuspeisen. Zu diesem Zweck wurden neue Rechteckhohlleiterbälge entworfen, hergestellt und erfolgreich getestet. Ein Blendenelement wurde zusätzlich als Schutz vor Wärmestrahlung integriert.

Dank seiner neuen magnetischen Abschirmung konnte innerhalb des Heliumtanks das Erdmagnetfeld im Bereich der supraleitenden Strukturen auf die bisher kleinsten am S-DALINAC erzielten Werte von  $4\ \mu\text{T}$  im Bereich der Kavitäten reduziert werden. Durch diese signifikante Verbesserung kann der Restwiderstand, der durch äußere Magnetfelder die Güte von Niobresonatoren bei  $2\ \text{K}$  begrenzt, auf ein Minimum reduziert werden, so dass bei guter Präparation der supraleitenden Kavitäten die bisherigen Güten [60] übertroffen und Werte von  $2 \cdot 10^9$  oder höher erreicht werden können. In diesem Zusammenhang wurden für das neue Kryostatmodul drei 20-zellige Beschleunigungsstrukturen nach neuestem Stand der Technik hergestellt. Das Verfahren unterschied sich grundsätzlich von der Herstellung der bisherigen Strukturen. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Vorgehen, konnten die drei neuen Kavitäten erfolgreich bei der korrekten Länge auf Frequenz und Feldglattheit eingestellt werden.

In einem Testlauf außerhalb des Beschleunigers konnte die externe Güte des neuen Einkopplers, der speziell für einen Strahlbetrieb mit hohen Strömen und Energien entwickelt wurde, bei  $2\ \text{K}$  und  $4\ \text{K}$  bestätigt werden. Mit Hilfe von Triple Stub Tunern, die im Rahmen einer Studienarbeit [34] entwickelt wurden, wird es in Zukunft möglich sein, die externe Güte zu variieren, so dass diese auch an die Anforderungen bei kleineren Strahlströmen [27] im rezirkulierten Strahlbetrieb angepasst werden kann. Die Funktionalität des gesamten Aufbaus in Hinblick auf Dichtigkeit und Wärmeeintrag ins Heliumbad konnte ebenfalls bei  $2\ \text{K}$  und  $4\ \text{K}$  gezeigt werden. Auch kam während des Testlaufs ein neuer Feintuner aus Pie-

zoaktuatoren zur Frequenzabstimmung der Beschleunigungsstruktur im Rahmen einer weiteren Arbeit [36] erfolgreich zum Einsatz. Der erzielte Frequenzhub war dabei mit 3 kHz um einen Faktor drei größer als bei den bisher verwendeten magnetostriktiven Elementen.

Ein weiteres Abkühlen zu Testzwecken außerhalb des Beschleunigers ist nicht mehr erforderlich. Mit den neuen Beschleunigungsstrukturen kann das Kryostatmodul vollständig bestückt gegen das bisherige Injektormodul ausgetauscht und dort eingesetzt werden. Allerdings müssen vorher noch passende Hohlleiterbauteile bereitgestellt werden, um den Transfer der Hochfrequenzleistung aus den Halbleiterverstärkern an das neue Modul sicherzustellen. Sie ersetzen die Adapter für die 7/8"-Koaxialeitung, die zusammen mit dem aktuell genutzten Modul entfernt werden. Dadurch steht dieses in Zukunft als komplett ausgerüstetes Reservemodul für den Hauptbeschleuniger zur Verfügung. Der Austausch eines Moduls ist nach dem Warmfahren der Anlage innerhalb von nur zwei Tagen möglich, während für die Wartung eines Moduls, beispielsweise zum Wechseln der Kavitäten, mindestens drei Wochen veranschlagt werden. Stillstandszeiten des Beschleunigers können somit um diesen Zeitraum verkürzt werden, da ein Modul einfach ausgetauscht werden kann und die anstehenden Wartungsarbeiten an diesem auch während des Betriebes stattfinden können.

# A Montage

Die folgende Beschreibung darf keineswegs als vollständige Montageanleitung verstanden werden. Vielmehr werden einige wichtige Schritte beim Zusammenbau des neuen Injektormoduls in der richtigen Reihenfolge aufgelistet. Auch sind im Vergleich zur Montage der Standardmodule zusätzliche Lecktests erforderlich. Details werden nicht aufgezählt. Als visuelle Unterstützung kann Abb. 6.2 herangezogen werden.

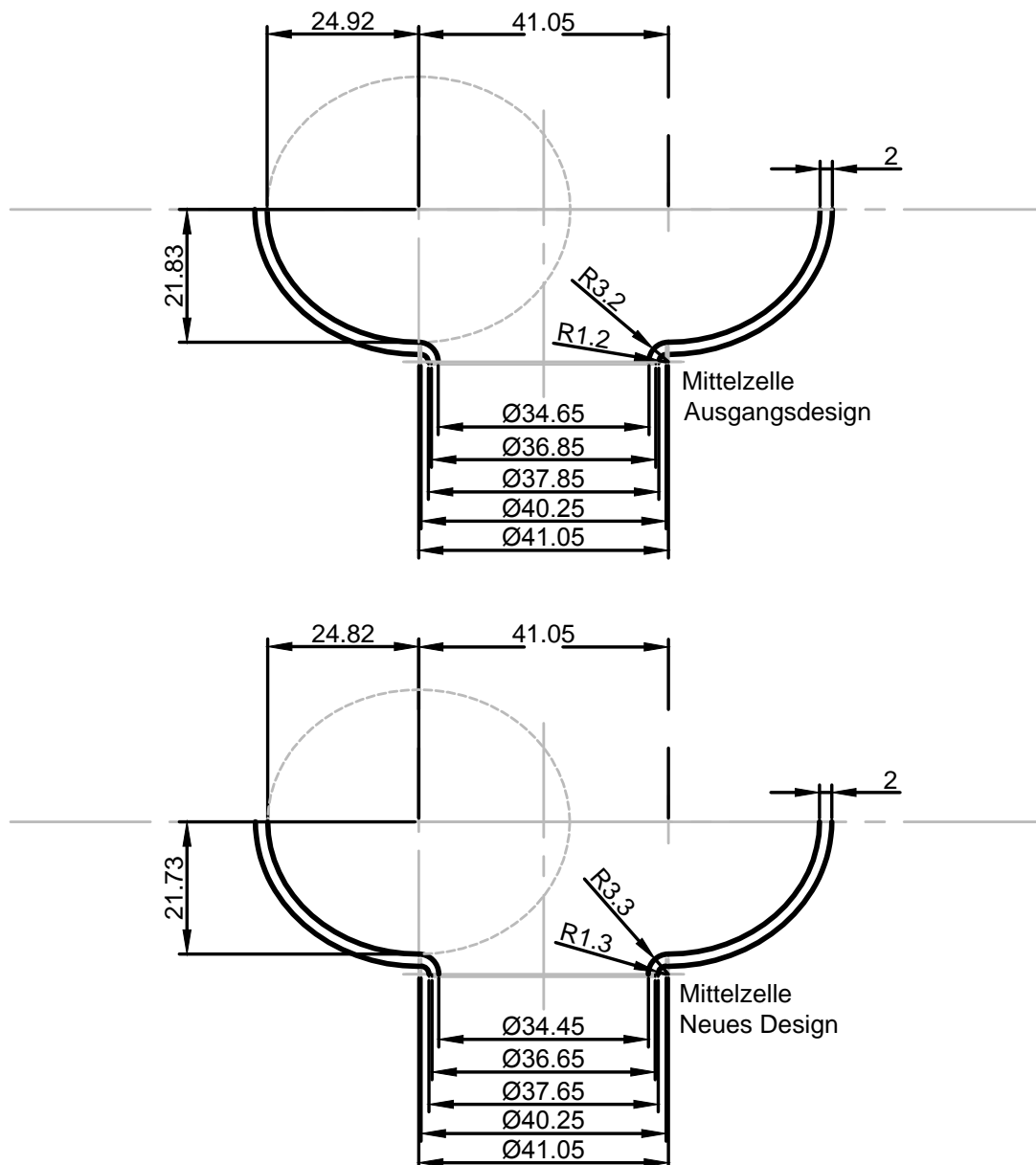
- Die Montage der Kavitäten, Tuner und Koppler in den Aluminiumrahmen erfolgt analog zu den Standardmodulen. Jedoch werden Piezos anstelle der magnetostriktiven Elemente als Feintuner verwendet. Auf eine lokale magnetische Abschirmung kann verzichtet werden. Für die Frequenzeinstellung müssen HF-Verstärker und eine große Mittelung am Netzwerkanalysator benutzt werden. Nach dem Lecktest des Strahlvakuumms ist dieses wieder zu belüften, und der Rechteckflansch am Einkoppler vakuumdicht verschlossen zu lassen.
- Nach dem Einbringen der Bank in den Heliumtank ist die Ausrichtung und Position der Einkoppler zu überprüfen, bevor der vordere und hintere Flansch zusammen mit denen für die Transferleitungen wie üblich abgedichtet werden. Den Stadionflansch zunächst mit einer Gummidichtung blindflanschen.
- Lecktest für den Heliumtank durchführen. Sind alle Flansche dicht, kann der Heliumtankdeckel in der Turmstektion wieder geöffnet werden.
- Unter Reinraumbedingungen das erste Hohlleitersegment auf den Einkopplern anbringen. Das obere Ende dieses Leitungsabschnitts sollte nach dem ersten Hohlleiterwellbalg vakuumdicht mit einem entsprechenden Blindflansch verschlossen sein. Gesetzte Verbindung mit einem Lecktest am Strahlvakuum überprüfen und danach wieder belüften.
- Metaldichtungen für stadionförmigen Heliumtankflansch und die kreisförmigen Durchgangsflansche der Hohlleiterverbindung auflegen. Danach den Heliumtank mit dem stadionförmigen Flansch abdichten. Dabei darauf achten, dass die kreisrunden Membranbälge nicht in ihrer Position fixiert sind,

so dass die daran befindlichen Gegenflansche sich nach denen der Hohlleiterverbindung ausrichten können. Erst nach dem Festziehen aller Schrauben die Position der Membranbälge mit Hilfe der Gewindestange fixieren. Das Durchführen der Kabel und Motorwellen aus dem Heliumtank beachten.

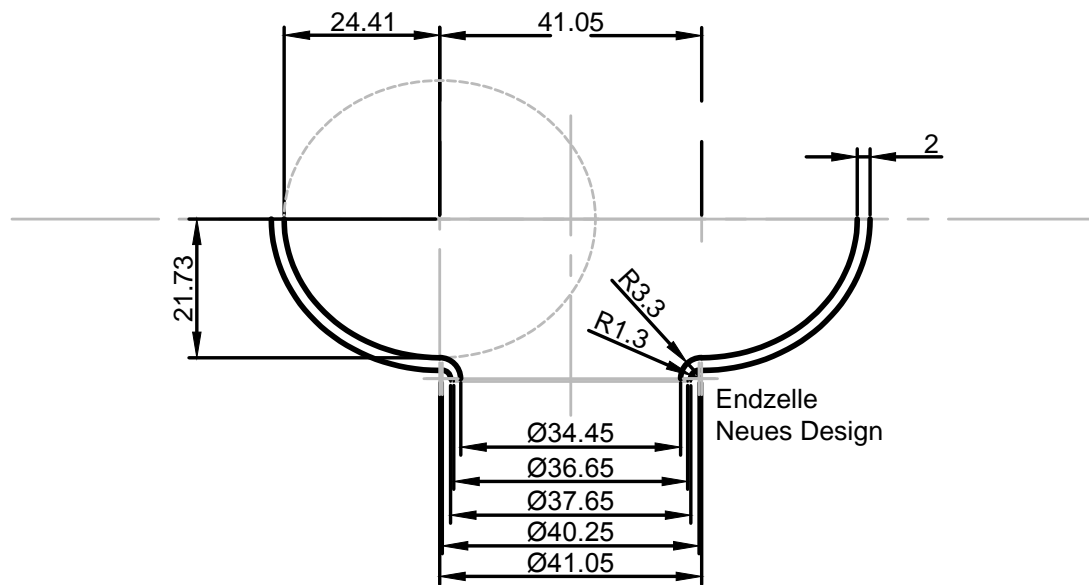
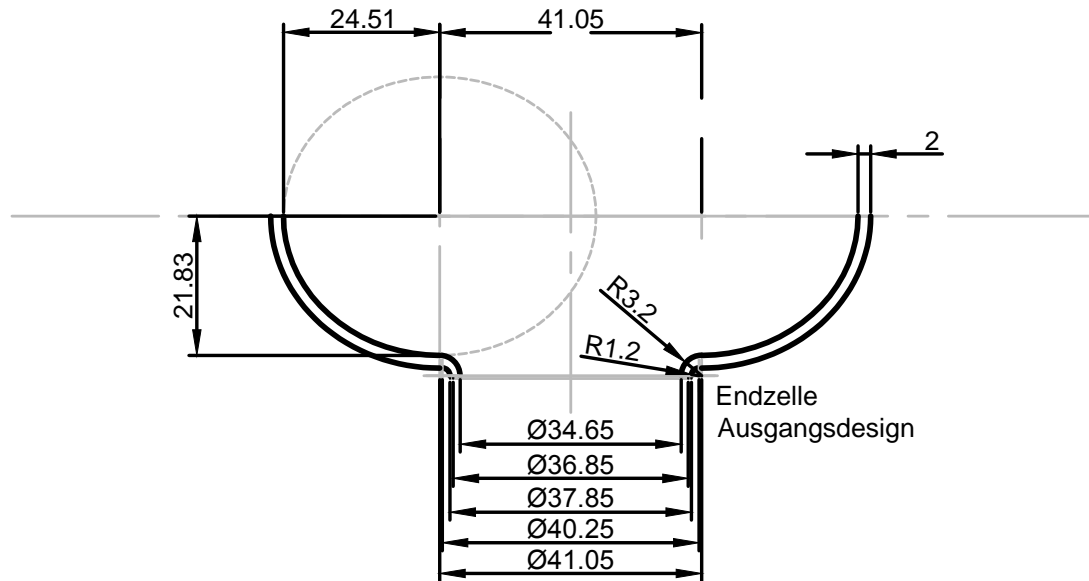
- Erneuten Lecktest am Heliumtank durchführen um die Dichtigkeit am Stationflansch und der Hohlleiterdurchführung zu überprüfen. Ohne Fixierung der Membranbälge können beim Pumpen des Vakuums große Kräfte auf die Hohlleiter einwirken.
- Nächsten Hohlleiterabschnitt mit Durchführungen unter Reinraumbedingungen anbringen und wiederum Lecktest der neuen Verbindungen durchführen.
- Superisolationen zwischen Heliumtank und dem Stickstoffschildturm anbringen. Anbindung des Stickstoffschildes mit Hilfe von Kupferlitzen an die Transferleitungen herstellen. Stickstoffschildturm mit Superisolation umgeben.
- Außenturm anbringen und das Modul mit Turmdeckel analog zum Heliumtankdeckel verschliessen. Auf die Fixierung der Membranbälge achten.
- Hohlleiterfenster unter Reinraumbedingungen anbringen und einen letzten Lecktest am Strahlvakuum durchführen.

## B Zeichnungen der Halbzellen

Skizzen der Halbzellengeometrien nach ursprünglichem und neuem Design. Die inneren Abmessungen änderten sich beim neuen Design um 0.1 mm. Dies geschah um den größeren Abtrag bei der späteren chemischen Behandlung der neuen Kavität zu berücksichtigen.







## C Daten aus der Hantelproduktion

Im Folgenden sind die Resonanzfrequenzen und Längen aller Bauteile für die Produktion der drei neuen Kavitäten, vor und nach dem Abdrehen, aufgelistet. Für die Hanteln gibt es jeweils drei Werte für jede Modenfrequenz. Der erste Wert ist die gemessene Resonanzfrequenz ohne Störkörper, die beiden anderen sind die Frequenzen, die gemessen wurden, wenn der Störkörper jeweils in der einen oder anderen Halbzelle war. Jede Halbzelle war mit TUD, einer Nummer und den Buchstaben M für Mittelhalbzelle, oder E für Endhalbzelle gekennzeichnet. Die Endgruppen hatten folglich nur eine Endhalbzelle.

Bauteil	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)
#1	2.850125	2.958063	53.62	2.868786	2.985690	51.18
TUD019.3M	2.849797	2.957781		2.868451	2.985383	
TUD001.1M	2.849828	2.957781		2.868448	2.985367	
#2	2.850000	2.956703	53.64	2.869081	2.985014	51.09
TUD016.2M	2.849687	2.956422		2.868740	2.984716	
TUD010.2M	2.849703	2.956422		2.868755	2.984699	
#3	2.849953	2.958703	53.65	2.868112	2.985997	51.17
TUD022.1M	2.849656	2.958406		2.867781	2.985707	
TUD003.4M	2.849656	2.958406		2.867790	2.985685	
#4	2.866313	2.981044	51.59	2.867200	2.983161	51.22
TUD018.4M	2.865983	2.980743		2.866858	2.982861	
TUD003.3M	2.865983	2.980743		2.866882	2.982847	
#5	2.865643	2.981897	51.64	2.866149	2.983607	51.29
TUD027.3M	2.865323	2.981587		2.865811	2.98331	
TUD004.4M	2.865303	2.981597		2.865819	2.9833	
#6	2.850859	2.958438	53.72	2.869666	2.986267	51.25
TUD011.2M	2.850563	2.958125		2.869345	2.98595	
TUD020.3M	2.850563	2.958128		2.869323	2.985974	
#7	2.850225	2.957531	53.67	2.868855	2.985405	51.13
TUD002.4M	2.849900	2.957244		2.868523	2.985085	
TUD017.2M	2.849950	2.957242		2.868511	2.9851	
#8	2.850250	2.957012	53.6	2.869279	2.98524	51.07
TUD018.3M	2.849937	2.956738		2.86894	2.984955	
TUD005.1M	2.849937	2.956725		2.868982	2.984923	

Bauteil	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)
#9	2.859584	2.967983	52.75	2.86959	2.984107	51.09
TUD010.1M	2.859254	2.967683		2.869267	2.983788	
TUD014.3M	2.859264	2.967683		2.869259	2.983814	
#10	2.851012	2.956738	53.79	2.870254	2.985632	51.1
TUD030.1M	2.850700	2.956450		2.869915	2.985336	
TUD015.3M	2.850700	2.956425		2.869933	2.985319	
#11	2.850662	2.958850	53.67	2.868951	2.987117	51.02
TUD011.4M	2.850350	2.958575		2.868634	2.986807	
TUD024.2M	2.850363	2.958563		2.868601	2.986836	
#12	2.851650	2.956125	53.74	2.871071	2.98502	51.09
TUD016.4M	2.851325	2.955837		2.870747	2.984705	
TUD017.1M	2.851338	2.955850		2.870735	2.984723	
#13	2.851262	2.955788	53.78	2.87095	2.985155	51.08
TUD010.4M	2.850938	2.955490		2.870615	2.984845	
TUD029.4M	2.850938	2.955480		2.870605	2.984856	
#14	2.850425	2.956037	53.71	2.87008	2.985279	51.07
TUD010.3M	2.850112	2.955763		2.869757	2.984956	
TUD016.3M	2.850112	2.955750		2.869735	2.984984	
#15	2.851088	2.961075	53.67	2.867326	2.987234	51.1
TUD011.3M	2.850788	2.960775		2.867005	2.986915	
TUD020.4M	2.850788	2.960787		2.866986	2.986947	
#16	2.850062	2.956738	53.64	2.868651	2.985036	50.99
TUD013.3M	2.849750	2.956425		2.868335	2.984714	
TUD021.1M	2.849737	2.956437		2.868323	2.984734	
#17	2.849813	2.955825	53.62	2.868873	2.984238	51.03
TUD018.2M	2.849500	2.955538		2.868544	2.98392	
TUD012.4M	2.849500	2.955538		2.868537	2.983937	
#18	2.850550	2.956688	53.71	2.871656	2.98775	51.15
TUD008.4M	2.850225	2.956387		2.871344	2.987438	
TUD003.2M	2.850225	2.956375		2.871313	2.987456	
#19	2.850907	2.957912	53.68	2.871844	2.988437	51.23
TUD029.3M	2.850586	2.957613		2.871525	2.988131	
TUD027.4M	2.850594	2.957600		2.871513	2.988144	
#20	2.851000	2.956625	53.74	2.872935	2.987675	51.32
TUD013.4M	2.850675	2.956325		2.8726	2.987369	
TUD008.3M	2.850687	2.956338		2.872594	2.987369	
#21	2.851450	2.956350	53.74	2.871781	2.985438	51.4
TUD002.3	2.851150	2.956062		2.871437	2.98515	
TUD025.1M	2.851163	2.956050		2.871469	2.985131	

Bauteil	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)
#22	2.850913	2.958912	53.63	2.872438	2.9899	51.18
TUD005.3M	2.850613	2.958625		2.872113	2.989594	
TUD028.2M	2.850600	2.958625		2.872131	2.989587	
#23	2.850050	2.956450	53.64	2.872569	2.988531	51.18
TUD014.2M	2.849737	2.956163		2.872238	2.988206	
TUD007.3M	2.849737	2.956150		2.872231	2.988237	
#24	2.849963	2.955700	53.64	2.872425	2.987875	51.1
TUD014.4M	2.849650	2.955425		2.872063	2.987581	
TUD028.3M	2.849650	2.955413		2.872094	2.987563	
#25	2.849912	2.955300	53.66	2.872838	2.988056	51.4
TUD022.3M	2.849600	2.955025		2.872488	2.987756	
TUD025.4M	2.849613	2.955013		2.872506	2.98775	
#26	2.850775	2.957500	53.64	2.874775	2.990794	51.26
TUD016.1M	2.850475	2.957225		2.874431	2.990506	
TUD021.4M	2.850475	2.957212		2.874444	2.990469	
#27	2.851012	2.957537	53.74	2.873737	2.9899	51.28
TUD025.2M	2.850687	2.957263		2.873394	2.989594	
TUD007.1M	2.850687	2.957238		2.873419	2.989587	
#28	2.850312	2.956525	53.71	2.873444	2.989438	51.18
TUD022.4M	2.850000	2.956250		2.873113	2.989125	
TUD012.1M	2.850013	2.956225		2.873094	2.989138	
#29	2.850087	2.957475	53.7	2.886556	3.007712	50.9
TUD002.1M	2.849788	2.957175		2.886156	3.007481	
TUD020.1M	2.849788	2.957175		2.886281	3.007325	
#30	2.851363	2.957912	53.72	2.873988	2.990181	51.19
TUD003.1M	2.851050	2.957613		2.87365	2.989875	
TUD019.1M	2.851037	2.957600		2.87365	2.989863	
#31	2.850650	2.959600	53.58	2.87245	2.990588	51.22
TUD005.4M	2.850325	2.959287		2.872113	2.990288	
TUD027.1M	2.850325	2.959300		2.872125	2.990281	
#32	2.850100	2.958634	53.65	2.872094	2.987287	51.16
TUD008.2M	2.849800	2.958337		2.87175	2.986994	
TUD029.2M	2.849800	2.958337		2.871756	2.986975	
#33	2.850287	2.958638	53.65	2.872725	2.990506	51.27
TUD021.3M	2.849950	2.958337		2.872381	2.990181	
TUD004.1M	2.849975	2.958337		2.872375	2.990206	
#34	2.850825	2.958088	53.73	2.873044	2.990162	51.21
TUD015.4M	2.850500	2.957813		2.872713	2.989863	
TUD017.3M	2.850512	2.957787		2.872719	2.989844	

Bauteil	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)
#35	2.850425	2.957725	53.7	2.873425	2.990675	51.14
TUD019.2M	2.850125	2.957413		2.873088	2.990375	
TUD011.1M	2.850125	2.957413		2.8731	2.99035	
#36	2.850625	2.956437	53.63	2.872488	2.987788	51.14
TUD024.1M	2.850312	2.956125		2.87215	2.987494	
TUD029.1M	2.850312	2.956125		2.872175	2.987469	
#37	2.850950	2.958000	53.71	2.874163	2.990975	51.23
TUD027.2M	2.850650	2.957713		2.873838	2.990663	
TUD015.2M	2.850637	2.957700		2.873806	2.990675	
#38	2.850275	2.959238	53.65	2.871844	2.990431	51.21
TUD007.2M	2.849975	2.958938		2.871506	2.990125	
TUD001.4M	2.849950	2.958950		2.871488	2.990144	
#39	2.850837	2.956400	53.75	2.871206	2.985556	51.49
TUD012.2M	2.850538	2.956100		2.87085	2.985288	
TUD006.3M	2.850538	2.956100		2.870894	2.985225	
#40	2.850875	2.957300	53.68	2.873475	2.989638	51.14
TUD001.3M	2.850575	2.957025		2.873125	2.989344	
TUD028.1M	2.850575	2.957012		2.873144	2.989325	
#41	2.849975	2.960962	53.56	2.871006	2.991044	51.29
TUD005.2M	2.849675	2.960675		2.87065	2.990744	
TUD017.4M	2.849650	2.960675		2.870662	2.990737	
#42	2.850662	2.956744	53.74	2.872937	2.988881	51.15
TUD013.1M	2.850350	2.956463		2.872581	2.988588	
TUD020.2M	2.850338	2.956437		2.872606	2.988569	
#43	2.850788	2.958800	53.7	2.872212	2.989863	51.23
TUD001.2M	2.850487	2.958506		2.871869	2.989575	
TUD019.4M	2.850487	2.958475		2.871894	2.989531	
#44	2.851688	2.956437	53.77	2.874385	2.9889	51.16
TUD021.2M	2.851375	2.956150		2.87407	2.988575	
TUD014.1M	2.851350	2.956125		2.874045	2.988605	
#45	2.850050	2.957925	53.67	2.872387	2.990038	51.15
TUD002.2M	2.849723	2.957625		2.872037	2.989737	
TUD028.4M	2.849725	2.957638		2.872056	2.989719	
#46	2.851037	2.956475	53.74	2.873537	2.9889	51.12
TUD018.1M	2.850725	2.956188		2.8732	2.988581	
TUD012.3M	2.850725	2.956175		2.873194	2.988588	
#47	2.850375	2.957325	53.71	2.8734	2.990069	
TUD013.2M	2.850050	2.957012		2.873094	2.98975	51.18
TUD008.1M	2.850056	2.957012		2.873069	2.989775	

Bauteil	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)	0-Mode (GHz)	$\pi$ -Mode (GHz)	Länge (mm)
#48	2.850788	2.959587	53.7	2.872263	2.988406	51.25
TUD025.3M	2.850462	2.957288		2.871944	2.988087	
TUD006.2M	2.850475	2.957275		2.871931	2.988106	
#49	2.850925	2.958263	53.7	2.872263	2.988938	51.25
TUD022.2M	2.850625	2.957988		2.871944	2.988612	
TUD015.1M	2.850625	2.957962		2.871938	2.988631	
#50	2.849663	2.959480	53.63	2.879331	2.999094	51.1
TUD004.3M	2.849362	2.959200		2.879013	2.99875	
TUD006.1M	2.849362	2.959188		2.878975	2.998813	
#51	2.850300	2.958950	53.63	2.871738	2.989925	51.19
TUD004.2M	2.849975	2.958675		2.871394	2.989613	
TUD007.4M	2.849975	2.958650		2.871412	2.989587	
#52	2.862250	2.973863	53.77	2.881169	3.002168	51.18
TUD031.2E	2.862000	2.973488		2.880897	3.001782	
TUD023.1M	2.861875	2.973638		2.880758	3.001924	
#53	2.862375	2.973400	53.74	2.889797	3.02316	50.01
TUD031.1E	2.862125	2.973012		2.889584	3.022708	
TUD023.4M	2.861988	2.973138		2.889341	3.022982	
#54	2.861712	2.970763	53.71	2.884381	3.00305	51.14
TUD033.1E	2.861463	2.970375		2.884125	3.002669	
TUD024.4M	2.861325	2.970537		2.883963	3.002806	
#55	2.861800	2.972775	53.72	2.883494	3.004051	51.18
TUD031.4E	2.861562	2.972388		2.883225	3.00367	
TUD023.3M	2.861413	2.972525		2.883075	3.003808	
#56	2.861925	2.973900	53.73	2.884913	3.005813	51.26
TUD031.3E	2.861675	2.973525		2.884631	3.00545	
TUD023.2M	2.861537	2.973675		2.884525	3.005569	
#57	2.861588	2.971875	53.69	2.884944	3.004331	51.16
TUD033.2E	2.861350	2.971500		2.884669	3.00395	
TUD024.3M	2.861200	2.971625		2.884556	3.004075	
TUD033.3E	2.925838		168.12	2.928335		167.81
TUD033.4E	2.925150		168.05	2.954868		166.6
TUD032.1E	2.926775		168.19	2.959269		166.71
TUD032.4E	2.925675		168.11	2.957235		166.65
TUD032.2E	2.925063		168.04	2.956589		166.58
TUD032.3E	2.926900		168.4	2.959404		166.8

# Literatur

- [1] A. Richter, *Operational Experience at the S-DALINAC*, Proc. of the 5<sup>th</sup> EPAC, Eds. S. Meyers, A. Pacheco, R. Pascual, C. Petit-Jean-Genaz, J. Poole, IOP Publishing, Bristol (1996) 110.
- [2] M. Brunken, H. Genz, M. Gopych, H.-D. Gräf, S. Khodyachykh, S. Kostial, U. Laier, A. Lenhardt, H. Loos, J. Mühl, M. Platz, A. Richter, S. Richter, B. Schweizer, A. Stascheck, O. Titze, S. Watzlawik, S. Döbert, *Latest Developments from the S-DALINAC*, Proc. of the 20<sup>th</sup> Intern. LINAC Conference, Ed. A. W. Chao, S.L. Yu, R.D. Ruth, SLAC-R-561 (2000) 152.
- [3] A. Richter, *Der neue Freie-Elektronen-Laser in Darmstadt*, Physikalische Blätter **54** (1998) 31.
- [4] M. Brunken, S. Döbert, H. Genz, H.-D. Gräf, R. Hahn, H. Loos, A. Richter, B. Schweizer, A. Stascheck, T. Wesp, *First Lasing of the Darmstadt CW Free Electron Laser*, Proc. of the 20<sup>th</sup> Intern. FEL Conference, Nucl. Instr. Meth. A **429** (1999) 21.
- [5] A. Araz, U. Bonnes, R. Eichhorn, F. Hug, M. Konrad, M. Platz, A. Richter, R. Stassen, *3 GHz digital rf control at the superconducting Darmstadt electron linear accelerator: First results from the baseband approach and extensions for other frequencies*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **13**, 082801 (2010).
- [6] M. Konrad, U. Bonnes, C. Burandt, R. Eichhorn, P. Nonn, J. Enders, N. Pietralla, *Digital base-band rf control system for the superconducting Darmstadt electron linear accelerator*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 052802 (2012).
- [7] Y. Poltoratska, C. Eckardt, W. Ackermann, K. Aulenbacher, T. Bahlo, R. Barday, M. Brunken, C. Burandt, R. Eichhorn, J. Enders, M. Espig, S. Franke, C. Ingenhaag, J. Lindemann, W.F.O. Müller, M. Platz, M. Roth, F. Schneider, M. Wagner, A. Weber, T. Weiland, B. Zwickler, *Status and recent developments at the polarized-electron injector of the superconducting Darmstadt electron linear accelerator S-DALINAC*, J. Phys.: Conf. Ser. **298**, 012002 (2011).

- [8] F. Hug, C. Burandt, R. Eichhorn, M. Konrad, N. Pietralla, *Measurements of a Reduced Energy Spread of a Recirculating Linac by Non-Isochronous Beam Dynamics*, Proc. of LINAC 2012, Tel Aviv, Israel, in press.
- [9] M. Kleinmann, J. Conrad, R. Eichhorn, F. Hug, N. Pietralla, *CW Energy Upgrade to the Superconducting Electron Accelerator S-DALINAC*, Proc. of IPAC 2012, New Orleans, USA, pp. 1161-1163.
- [10] M. Kleinmann, R. Eichhorn, F. Hug, N. Pietralla, *Upgrade Plans on the Superconducting Electron Accelerator S-DALINAC*, Proc. of IPAC 2011, San Sebastián, Spain, pp. 2010-2012.
- [11] Th. Walcher, R. Frey, H.-D. Gräf, E. Spamer, H. Theissen, *High resolution electron scattering facility at the Darmstadt linear accelerator (DALINAC): II. Beam transport system and spectrometer (energy-loss system)*, Nucl. Instr. and Meth. **153** (1978) 17.
- [12] C. Lüttge, C. Hofmann, J. Horn, F. Neumeyer, A. Richter, G. Schrieder, E. Spamer, A. Stiller, D. I. Sober, S. K. Matthews, L. W. Fagg, *Large-aperture system for high-resolution 180° electron scattering*, Nucl. Instr. and Meth. A **366** (1995) 325.
- [13] O. Burda, N. Botha, J. Carter, R. W. Fearick, S. V. Förtsch, C. Fransen, H. Fujita, J. D. Holt, M. Kuhar, A. Lenhardt, P. von Neumann-Cosel, R. Neveling, N. Pietralla, V. Yu. Ponomarev, A. Richter, O. Scholten, E. Sideras-Haddad, F. D. Smit, J. Wambach, *High-Energy-Resolution Inelastic Electron and Proton Scattering and the Multiphonon Nature of Mixed-Symmetry  $2^+$  States in  $^{94}\text{Mo}$* , Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 092503.
- [14] M. Chernykh, H. Feldmeier, T. Neff, P. von Neumann-Cosel, A. Richter, *Structure of the Hoyle State in  $^{12}\text{C}$* , Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 032501.
- [15] K. Lindenberg, *Development and Construction of the Low-Energy Photon Tagger NEPTUN*, D17, Dissertation, TU Darmstadt, 2007.
- [16] N. Ryezayeva, H. Arenhövel, O. Burda, A. Byelikov, M. Chernykh, J. Enders, H. W. Griesshammer, Y. Kalmykov, P. von Neumann-Cosel, B. Özel, I. Poltoratska, I. Pysmenetska, C. Rangacharyulu, S. Rathi, A. Richter, G. Schrieder, A. Shevchenko, O. Yevetska, *Measurement of the Reaction  $^2\text{H}(e, e')$  at*



- 180° close to the Deuteron Breakup Threshold, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 172501.
- [17] M. Chernykh, H. Feldmeier, T. Neff, P. von Neumann-Cosel, A. Richter, *Pair Decay Width of the Hoyle State and its Role for Stellar Carbon Production*, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 022501.
- [18] O. Yevetska, S. Watzlawik, J. Ahrens, G. Alkhazov, V. Chizhov, E. Maev, P. von Neumann-Cosel, E. Orischin, G. Petrov, J.-M. Porte, A. Richter, V. Sarantsev, G. Schrieder, Y. Smirenin, *New experimental method for investigation of the nucleon polarizabilities*, Nucl. Instr. and Meth. A **618** (2010) 160.
- [19] K. Sonnabend, D. Savran, J. Beller, M. A. Büssing, A. Constantinescu, M. Elvers, J. Endres, M. Fritzsche, J. Glorius, J. Hasper, J. Isaak, B. Löher, S. Müller, N. Pietralla, C. Romig, A. Sauerwein, L. Schnorrenberger, C. Wälzlein, A. Zilges, M. Zweidinger, *The Darmstadt High-Intensity Photon Setup (DHIPS) at the S-DALINAC*, Nucl. Instr. and Meth. A **640** (2011) 6.
- [20] O. Yevetska, J. Enders, M. Fritzsche, P. von Neumann-Cosel, S. Oberstedt, A. Richter, C. Romig, D. Savran, K. Sonnabend, *Dipole strength in the  $^{235}\text{U}(\gamma, \gamma')$  reaction up to 2.8 MeV*, Phys. Rev. C **81** (2010) 044309.
- [21] P. Mohr, K. Vogt, M. Babilon, J. Enders, T. Hartmann, C. Hutter, T. Rauscher, S. Volz, A. Zilges, *Experimental simulation of a stellar photon bath by bremsstrahlung: the astrophysical gamma-process*, Phys. Lett. B **488** (2000) 127.
- [22] P. Schardt, *Mikrowellenexperimente zum chaotischen Verhalten eines supraleitenden Stadion-Billard und Entwicklung einer Einfangsektion am S-DALINAC*, D17, Dissertation, TH Darmstadt, 1995.
- [23] S. Döbert, R. Eichhorn, H. Genz, H.-D. Gräf, R. Hahn, T. Hampel, S. Kostial, H. Loos, M. Reichenbach, A. Richter, V. Schlott, E. Spamer, A. Stascheck, M. Thomas, O. Titze and T. Wesp, *Operational Experience at the Superconducting Electron Accelerator S-DALINAC*, Proc. 18<sup>th</sup> Int. Lin. Acc. Conf., Eds. C. Hill and M. Vretenar, Geneva, CERN 96-07 (1996) 260.

- [24] F. Hug, C. Burandt, J. Conrad, R. Eichhorn, M. Kleinmann, M. Konrad, T. Kürzeder, P. Nonn, N. Pietralla, S. Sievers, *Operational Findings and Upgrade Plans on the Superconducting Electron Accelerator S-DALINAC*, Proc. of PAC 2011, New York, USA, pp. 1999-2001.
- [25] J. Auerhammer, H. Genz, H.-D. Gräf, V. Huck, C. Lüttge, A. Richter, T. Rietdorf, P. Schardt, E. Spamer, K. Rühl, A. Stascheck, F. Thomas, O. Titze, J. Töpfer, H. Weise, *Latest of the Superconducting Darmstadt Electron Accelerator S-DALINAC*, Proc. of SRF 1991, Hamburg, pp. 110-120.
- [26] V. Aab, K. Alrutz-Ziemssen, R. Amend, D. Flasche, H.-D. Gräf, H. Heinrichs, V. Huck, K. D. Hummel, M. Knirsch, F. Lindqvist, W. Lotz, H. Piel, J. Pouryamout, A. Richter, T. Rietdorf, U. Schaaf, S. Simrock, E. Spamer, O. Titze, H. Weise, W. Ziegler, *The Superconducting 130 MeV Electron Accelerator at Darmstadt*, Proc. of SRF87, ANL, Argonne, USA, 1988, pp. 127-139.
- [27] T. Rietdorf, *Entwurf und Realisierung einer variablen supraleitenden Hochfrequenz-Einkopplung für die Beschleunigungsstrukturen des supraleitenden Darmstädter Elektronenbeschleunigers S-DALINAC*, D17, Dissertation, TH Darmstadt, 1993.
- [28] M. Kunze, M. Brunken, H.-D. Gräf, W. F. O. Müller, A. Richter, T. Weiland, *3 GHz Waveguide-to-Coax Transition for RF Input Power Couplers*, Frequenz **58** (2004) 11-12, pp. 256-258.
- [29] T. Kürzeder, W. Ackermann, A. Araz, M. Brunken, J. Conrad, R. Eichhorn, J. D. Fuerst, H.-D. Gräf, M. Hertling, F. Hug, M. Konrad, W. F. O. Müller, M. Platz, A. Richter, S. Sievers, B. Steiner, T. Weiland, *Injector Upgrade for the S-DALINAC*, Proc. of EPAC 2008, Genoa, Italy, pp. 2731-2733.
- [30] J. Fuerst, Argonne National Laboratory (ANL), *private Mitteilung*.
- [31] J. G. Weisend II, *Handbook of Cryogenic Engineering*, Taylor & Francis, Philadelphia, 1998.
- [32] T. Moreno, *Microwave Transmission Design Data*, Artech House, Boston, 1989.

- [33] T. Kürzeder, J. Conrad, R. Eichhorn, J.D. Fuerst, B. B. Garcia, H.-D. Gräf, C. Liebig, W.F.O. Müller, A. Richter, F. Schlender, S. Sievers, T. Weiland, *Injector Upgrade for the Superconducting Electron Accelerator S-DALINAC*, Advances in Cryogenic Engineering **55A**, J. G. Weisend II et al., Melville, New York, 2010, pp. 831-838.
- [34] B. B. Garcia, Studienarbeit, TU Darmstadt, 2009 (unveröffentlicht).
- [35] T. Kürzeder, J. Conrad, R. Eichhorn, F. Hug, A. Richter, S. Sievers, *New Injector Cryostat Module Based on 3 GHz SRF Cavities for the S-DALINAC*, Advances in Cryogenic Engineering **57A**, J. G. Weisend II et al., Melville, New York, 2012, pp. 961-968.
- [36] S. Sievers, Dissertation, TU Darmstadt, in Vorbereitung.
- [37] <http://www.lakeshore.com>
- [38] M. Gopych, *Einfluss von Magnetfeldern auf die Güte der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC und Untersuchungen zur Feldemission*, D17, Dissertation, TU Darmstadt, 2003.
- [39] C. Liebig, *Konzeption und Aufbau einer magnetischen Abschirmung für den Injektor des S-DALINAC*, Bachelor Thesis, TU Darmstadt, 2009 (unveröffentlicht).
- [40] H. Padamsee, J. Knobloch, and T. Hays, *RF Superconductivity for Accelerators, 2nd Edition*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2008).
- [41] C. Valet, M. Boloré, B. Bonin, J.P. Charrier, B. Dailant, J. Gratadour, F. Koechlin, H. Safa, *Flux trapping in superconducting cavities*, Proc. of the 3<sup>rd</sup> EPAC, Eds. H. Henke, H. Homeyer, C. Petit-Jean-Genaz, (1992) 1295.
- [42] F. Schäfer, *Untersuchung der Zeitumkehrinvarianz in Quantenbillards*, Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2005 (unveröffentlicht).
- [43] V. Mane, T. Shea, *Implementtion of the TRL Algorithm for improved impedance measurements*, RHIC project, Brookhaven National Library, AD/RHIC/RD-58.

- [44] D. Rytting, *Network Analyzer Error Models and Calibration Methods*, Agilent Technologies, HP.
- [45] CST Computer Simulation Technology AG: [www.cst.com](http://www.cst.com).
- [46] P. Schardt, *Entwicklung und Erprobung einer Methode zur Einstellung der Feldglattheit der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen für den S-DALINAC*, Diplomarbeit, TH Darmstadt, 1990 (unveröffentlicht).
- [47] W. Bayer, R. Eichhorn, M. Gopych, H.-D. Gräf, J. Hasper, A. Richter, A. Zilges *X-ray spectroscopy—a new method to investigate field emission in superconducting accelerating cavities*, Nucl. Instr. and Meth. A **575** (2007) 321.
- [48] G. Kreps, D. Proch, J. Sekutowicz, *Half-cell and dumbbell frequency testing for the correction of the TESLA cavity length*, Proc. of SRF 1999, Santa Fe, New Mexico, pp. 499-504.
- [49] A. Brinkmann, W. Singer, *Nondestructive Testing of Niobium Sheets for SRF Cavities Using Eddy-current and SQUID Flaw Detection*, Proc. of LINAC 2008, Victoria, Canada, pp. 800-802.
- [50] John C. Slater, *Microwave Electronics*, sixth printing, D. van Nostrand Company, New York (1950).
- [51] T. Kürzeder, *Neueinstellung der Feldglattheit der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen für den S-DALINAC*, Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2006 (unveröffentlicht).
- [52] G. Kreps, *private Mitteilung*.
- [53] M. Kleinmann, *Verbesserung des Verfahrens zur Einstellung der Feldglattheit an supraleitenden Beschleunigungsstrukturen für den S-DALINAC*, Bachelor Thesis, TU Darmstadt, 2009 (unveröffentlicht).
- [54] R. Eichhorn, A. Araz, M. Brunken, J. Conrad, H.-D. Gräf, M. Hertling, F. Hug, M. Konrad, T. Kürzeder, M. Platz, A. Richter, S. Sievers, T. Weilbach, *Results from a 850 C Heat Treatment and Operational Findings from the 3 GHz SRF Cavities at the S-DALINAC*, Proc. of SRF 2007, Beijing, China, pp. 163-165.

- [55] L. Eidam, *Modenmischung zwanzigzelliger Beschleunigungskavitäten bei unterschiedlicher Güte*, Bachelor Thesis, TU Darmstadt, 2011 (unveröffentlicht).
- [56] S. Sievers, *Verbesserung der Güte der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC durch thermische Behandlung*, Diplomarbeit, TU Darmstadt, 2007 (unveröffentlicht).
- [57] M. Hertling, *Aufbau einer zentralen und relationalen Datenbank und Entwicklung einer graphischen Benutzeroberfläche für den S-DALINAC*, Dissertation (2008) D 17, TU Darmstadt.
- [58] H. Alt, H.-D. Gräf, H. L. Harney, R. Hofferbert, H. Lengeler, A. Richter, P. Schardt, H. A. Weidenmüller *Gaussian Orthogonal Ensemble Statistics in a Microwave Stadium Billiard with Chaotic Dynamics: Porter-Thomas Distribution and Algebraic Decay of Time Correlations*, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) pp. 62-65.
- [59] R. Eichhorn, A. Araz, J. Conrad, F. Hug, A. Kuhl, C. Liebig, M. Konrad, T. Kürzeder, F. Schlender, S. Sievers, *Cold Leak problems related to Helicoflex gaskets and recent results from the S-DALINAC*, Proc. SRF 2009, Berlin Germany, pp. 240-243.
- [60] H.-D. Gräf, M. Brunken, S. Döbert, H. Genz, M. Gopych, S. Khodyachykh, S. Kostial, U. Laier, H. Loos, A. Richter, S. Richter, B. Schweizer, A. Stascheck, O. Titze, *Operation of the S-DALINAC, related Topics and Developments*, Proc. of SRF 1999, Santa Fe, New Mexico, pp. 65-69.



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein erster Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Professor em. Dr. Dr. h.c. mult. A. Richter, der es mir ermöglichte, diese Arbeit auf dem spannenden Gebiet der Beschleunigerphysik durchführen zu können.

Herrn Professor Dr. T. Weiland danke ich für die Übernahme des Korreferates und die Zusammenarbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereichs. Auch den Mitarbeitern seines Instituts, insbesondere Herrn Dr. W. F.O. Müller, möchte ich für die Hilfe bei der Benutzung von Microwave Studio danken.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Dr. R. Eichhorn bedanken. Sein umfassendes Wissen über Beschleunigerphysik und -technik waren eine enorme Hilfe bei der Lösung etlicher Probleme.

Besonders herzlich danke ich Herrn Dr. H.-D. Gräf für die zahlreichen Hinweise und sein fortwährendes Interesse an meiner Arbeit auch in seinem Ruhestand.

Ebenfalls bedanke ich mich bei den Mitgliedern der Chaosgruppe für ihre Hilfsbereitschaft bei HF-Messungen, insbesondere bei den Herren Dr. S. Bittner und Dr. M. Miski-Oglu.

Bei J. Fuerst vom Argonne National Laboratory bedanke ich mich für seine Hilfe bei der Auslegung des Kryostaten.

Den Herren J. Iversen und G. Kreps von der MHF-sl Gruppe am DESY danke ich für die Unterstützung bei der Herstellung der Kavitäten.

Die vorliegende Arbeit wurde gefördert durch Mittel aus dem DFG Sonderforschungsbereich 634.





## **LEBENS LAUF**

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.



Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen habe.

Darmstadt, im Oktober 2012